

Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

# (RE)Pensar o uso do Tijolo em Arquitetura através de Fabricação Digital

João Vitor Pereira Azevedo

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura  
pela Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

Orientador Científico

Professor José Pedro Ovelheiro Marques de Sousa,  
Da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto

Porto, Setembro 2013

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio e compreensão demonstrados nestes anos de faculdade, em especial à Vanessa, minha namorada, com amor, admiração e gratidão pelo carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

## **Agradecimentos**

Não obstante o lado de introversão inerente ao desenvolvimento de uma dissertação, a presente resultou do importante contributo de um leque significativo de pessoas, transformando-a num produto coletivo, às quais apresento a minha gratidão.

Ao Professor José Pedro Sousa, orientador da dissertação, agradeço a partilha dos seus conhecimentos, bem como a disponibilidade demonstrada, acompanhada de grande incentivo.

Aos meus colegas do projeto de investigação da IJUP, Manuel Oliveira e José Campos, agradeço a camaradagem e a amizade desenvolvida durante estes cinco anos de curso.

À minha família, que muito contribuiu para a execução deste trabalho, à minha mãe, ao meu pai e aos meus irmãos pelo seu apoio constante. À Vanessa, minha namorada e meu braço direito, um agradecimento especial pela colaboração maior.





*“Originalidade é voltar às origens, de modo que os originais são aqueles que com novos meios voltam à simplicidade das primeiras soluções.” Antonio Gaudi*

## **Resumo**

A mudança paradigmática da fabricação digital, que se expressa nos dias de hoje, encoraja os arquitetos a incorporar os novos conhecimentos em materiais empregues em tempos idos com novas técnicas, na expectativa de solucionar problemas de construção.

Tendo em conta a construção tradicional em alvenaria e os processos robotizados, esta dissertação, com o intuito de repensar os processos clássicos de construção em tijolo, experimentará métodos de fabricação digital automatizados para uma estrutura complexa e dotada de dupla curvatura. Inicia com uma investigação sobre processos usados em alvenaria e das suas principais insuficiências, seguido dos métodos atuais de fabricação digital e das suas aplicações. Com base nestes tópicos e com o auxílio da integração do autor no grupo de Investigação Jovem da Universidade do Porto (IJUP), serão explorados processos de desenho computacional paramétrico e algorítmico (CAD), de forma a elaborar formas complexas a partir de elementos *standard* e obter coordenadas de localização no espaço. Ainda com a utilização dos dados obtidos, serão explorados processos de montagem automatizada, com o intuito de agarrar, transportar, orientar e posicionar cada um dos tijolos no espaço físico.

**Palavras-chave:** Construção em tijolo, Desenho Digital, Fabricação digital, Personalização, Formas complexas.



*“Originality is take back to the origins, such that the originals are those with new means return to the simplicity of the first solutions”* Antonio Gaudi

## **Abstract**

The paradigmatic change of digital fabrication, present nowadays, incites the architects to incorporate the new acquirements in materials already used and solve ancient construction problems with new techniques.

Taking into account the masonry construction and the robotic processes, this essay will experiment new methods of digital fabrication for an organic structure and *free-form*, through an automatic element. In order to develop the classic procedures of masonry construction. Beginning with research about the techniques used to make masonry and his principal faults, followed by the current approaches of digital fabrication and their applications. Based on these topics and with the integration of the author in a research group of *Investigação Jovem da Universidade do Porto (IJUP)*, processes of parametric and algorithmic computational design (CAD) will be explored, in order to elaborate complex forms as from standard elements and get coordinates in space. Still, with the data obtained, will be explored processes of automatic assembly, with the intention to grab, carry, orient and positioning each brick in physical space.

**Keywords:** Masonry Construction, Digital Design, Digital Fabrication, Customization, Complex Forms



# ÍNDICE

1. ENQUADRAMENTO GERAL DO PROBLEMA DE INVESTIGAÇÃO.....	0
1.1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVO.....	4
1.3. METODOLOGIA.....	5
1.4. ORGANIZAÇÃO.....	6
2. CONTEXTO HISTÓRICO.....	8
2.1. INTRODUÇÃO.....	9
2.2. EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO.....	11
2.3. SEQUÊNCIA DE CONSTRUÇÃO.....	13
2.4. LIMITAÇÕES.....	16
2.5. CONSIDERAÇÕES.....	18
3. OBRAS DE REFERÊNCIA DE ARQUITETURA EM TIJOLO.....	20
3.1. INTRODUÇÃO.....	21
3.2. RAFAEL GUASTAVINO: “ST JOHN THE DIVINE”.....	23
3.3. ELÁDIO DIESTE: IGREJA DE CRISTO OBREIRO.....	25
3.4. FRANK O. GEHRY: MARTa HERFORD.....	27
3.5. TONGXIAN GATEHOUSE: OFFICE dA.....	29
3.6. CONSIDERAÇÕES.....	30
4. FABRICAÇÃO DIGITAL.....	32
4.1. INTRODUÇÃO.....	33
4.2. DESENHO COMPUTACIONAL.....	35
4.3. TECNOLOGIAS DE FABRICAÇÃO.....	39
4.3.1. FABRICAÇÃO ADITIVA.....	41
4.3.2. FABRICAÇÃO SUBTRATIVA.....	43
4.3.3. FABRICAÇÃO FORMATIVA.....	45
4.3.4. CONSTRUÇÃO DIGITAL.....	47
4.3.5. MONTAGEM DIGITAL.....	49
4.4. CONSIDERAÇÕES.....	50
5. ALVENARIA DIGITAL.....	52
5.1. INTRODUÇÃO.....	53
5.2. CASO DE ESTUDO: PHILIPPE BLOCK.....	55
5.2.1. ABÓBADAS DE DUPLA CURVATURA.....	57
5.3. CASO DE ESTUDO: GRAMAZIO E KOHLER.....	59
5.3.1. GANTENBEIN WINERY.....	61
5.3.2. STRUCTURAL OSCILATIONS.....	63
5.3.3. PROGRAMMED COLUMNS.....	65
5.4. CASO DE ESTUDO: PROJETO DE INVESTIGAÇÃO IJUP.....	67
5.4.1. MÉTODOS E TÉCNICAS.....	69
5.4.2. EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS.....	71
6. CONCLUSÃO.....	80
BIBLIOGRAFIA.....	86
ÍNDICE DE IMAGENS.....	90
APPENDIX.....	94





# **1. ENQUADRAMENTO GERAL DO PROBLEMA DE INVESTIGAÇÃO\_**



## 1.1. INTRODUÇÃO

Quando o Ser Humano optou entre o estilo de vida nómada e o sedentário, iniciaram-se as construções de abrigos com elementos mais sólidos e com fundações mais resistentes. Pfeiter (2001) afirma que a terra, entre as matérias-primas naturais mais abundantes, mostrou ser um dos materiais indicados à formação de paredes, para segurança e conforto das pessoas. Da terra, como matéria-prima, produziu-se argila que ao longo de tempos, foi utilizada para manter as pedras e outros elementos das paredes no lugar. Mais tarde, através do mesmo princípio, moldou-se a argila em blocos, que depois de secos, tornavam-se elementos de construção mais regulares do que as pedras em bruto. Com o passar dos tempos, o bloco de argila, também conhecido como tijolo, manteve-se presente na Arquitetura mundial.

O Homem, não obstante a sua importância a nível ecológico e também tectónico, foi colocando de parte o tijolo e deu lugar a outros materiais. A facilidade de aplicação e a flexibilidade proporcionada por materiais como o betão atribuíram ao tijolo o rótulo de material muito trabalhoso e de difícil adaptabilidade a situações mais complexas.

Paralelamente a esta forma de ver os materiais, a qualidade da produção dos mesmos e as técnicas de

construção evoluíram significativamente. No entanto, e apesar da Humanidade ter evoluído drasticamente no âmbito tecnológico e da construção, ainda recorre, em certos aspetos, a processos manuais e trabalhosos, que através de conhecimentos obtidos em outras áreas, podem dar à construção em alvenaria um novo rumo no caminho da Arquitetura contemporânea.

Em tempos passados, o projeto era comunicado, pelo arquiteto, apenas com tinta e papel e redesenhado vezes sem conta. Qualquer alteração a esses desenhos era uma tarefa penosa de raspar, limpar e voltar a desenhar, ou até mesmo, recomeçar tudo de novo. Por conseguinte, tangencialmente ao progresso mecânico descrito anteriormente, a evolução dos meios digitais, ganha cada vez mais importância. As novas tecnologias invadem de dia para dia a vida de cada pessoa, pondo à disposição várias ferramentas de produtividade e também de lazer. O mesmo se aplica aos arquitetos, através do desenvolvimento do desenho computacional CAD (*Computer Aided Design*). Este método viabiliza um leque de ferramentas que influenciam a rapidez de produção e a complexidade com que o Arquiteto consegue lidar. Proporciona assim, novas soluções num espaço de tempo severamente reduzido, comparativamente com os meios tradicionais de desenho.

Villman (1995) refere que, durante o séc. XX e desde o desenvolvimento do nível de sofisticação dos equipamentos automatizados, da mecanização e da energia disponível por trabalhador, tanto nas construções de pequena como nas de grande escala, seria de esperar um equivalente avanço tecnológico no processo

construtivo. Contudo, afirma Villman (1995), tal objetivo não tem sido alcançado uma vez que a mão-de-obra diminuiu, devido à necessidade de trabalhadores predominantemente em linhas de montagem ou em processos mecanizados que necessitam de controle humano. No entanto, no séc. XXI as novas tecnologias têm vindo a alterar este rumo e o avanço tecnológico na Arquitetura está cada vez mais inerente ao processo construtivo. Com isto, outra vertente destas novas tecnologias, tem vindo a ser explorada, de forma a dar resposta a este atraso no desenvolvimento na construção. Apelidamos essa tecnologia de Fabricação Digital, designada também como processos CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Sendo esta inseparável da anterior, CAD, encoraja os arquitetos a utilizar processos industriais, já utilizados em fábricas, de forma a encontrar novas soluções, tanto no processo de desenho como na automatização da construção. Facultando assim, a flexibilidade necessária para dar resposta a novas ideias e permitindo ao Arquiteto otimizar a resposta dos seus produtos a uma nova tendência de Arquitetura singular.

## 1.2. OBJETIVO

Neste contexto, e com o intuito de flexibilizar o processo convencional de construção em tijolo através de fabricação digital, esta dissertação tem como objetivo a investigação de um processo emergente internacionalmente e que, em Portugal, ainda não se encontra explorado. Este consiste na fabricação de uma parede de alvenaria de tijolo por meios digitais e robotizados. Para tal são necessárias duas fases de automatização: o Desenho Paramétrico (CAD) e a Assemblagem Robotizada (CAM). A partir destes processos automatizados, o Arquiteto pode gerar um código de coordenadas de posicionamento dos tijolos, proveniente do modelo paramétrico e por sua vez enviar o código para o braço robótico. Algo que, até então era impensável devido à necessidade de conceção de desenhos Bi ou Tridimensionais e o respetivo envio para fábricas. Esta dificuldade estava presente, visto que a tecnologia robotizada era um meio dispendioso e que o seu manuseamento requeria sempre alguém especializado. Ciente que a construção em tijolo tradicional apresenta um decrescente protagonismo na Arquitetura contemporânea, devido às suas limitações formais e geométricas, o autor entende que o processo de assemblagem robótica automatizada, pode restituir ao tijolo, a importância relativamente a outros materiais. Em suma, o objetivo geral desta dissertação visa explorar a tecnologia de fabrico digital mais avançada e flexível disponível atualmente – o braço robótico – com o intuito de investigar o seu potencial de inovação formal e construtivo em paredes de alvenaria de tijolo.

## 1.3. METODOLOGIA

Uma breve revisão, ainda que atenta, sobre a arquitetura contemporânea leva-nos a depreender que muitas das obras construídas pelo mundo são resultado do crescente interesse na exploração de soluções únicas tanto a nível construtivo como a nível formal. Por um lado, o Arquiteto procura deixar na obra um marco histórico, que possa perdurar no tempo, por outro, tenta usar o máximo de tecnologia e conhecimento disponíveis, pois só assim pode ter a liberdade de construir o que a sua imaginação alcança. A exploração de tecnologias de CAD/CAM trouxe ao arquiteto um novo leque de ferramentas capazes de desafiar a indústria construtiva, flexibilizando os seus produtos e processos. Neste contexto, ciente do paradigma da construção em tijolo tradicional e das limitações formais e económicas inerentes a uma Arquitetura geometricamente única, o autor sentiu a necessidade de investigar métodos e processos que possibilitem uma flexibilização deste tipo de construção. Baseando-se em referências do mundo da Arquitetura como Eládio Dieste, Rafael Guastavino, Frank O. Gehry, entre outros, foi possível um conhecimento mais aprofundado da história do tijolo. Com base nas referências, foram também recolhidos os recursos teóricos necessários para melhor compreender as técnicas de fabricação e desenho digital. Contudo, uma investigação deste tipo dificilmente se baseia apenas em teorias. Logo à partida, foi necessário uma aproximação prática às tecnologias industriais e robotizadas, resultando no ingresso do autor, em um grupo de investigação científico, incorporado no

programa IJUP (Investigação Jovem da Universidade do Porto), onde o tema de investigação se debruçou, à semelhança desta tese, sobre a alvenaria robotizada. O objetivo da participação do autor neste projeto, visou, não só na obtenção de resultados práticos para a elaboração da dissertação, mas também, tendo como base a premissa “*learning by making*”, aprender fazendo, máxima deste projeto de investigação.

## 1.4. ORGANIZAÇÃO

A organização desta dissertação baseia-se num fio condutor temporal que tem início, no “Contexto Histórico” em que o tijolo está inserido, onde é explorada a evolução do fabrico do tijolo e a sequência de construção. Seguidamente, é feita uma abordagem às “Obras de Referência de Construção em Tijolo”, onde são referidos autores como: Eládio Dieste; Rafael Guastavino; Frank O. Gehry; Ponce de Leon e Tehrani. De cada autor, é escolhida uma obra em que os processos e materiais utilizados são pertinentes para a elaboração da dissertação. Não obstante, um conhecimento profundo das origens requer também, um estudo abrangente da atualidade. Foram também investigados os métodos de “Fabricação Digital”, onde são descritos os diferentes tipos de desenho computacional e de fabricação digital. Por conseguinte, será explorada mais profundamente a “Alvenaria Robotizada”, onde são apresentados casos de estudo na prática e está presente ainda, o desenvolvimento do caso de estudo do projeto de investigação. Por fim, é exposta uma “Conclusão”, onde são avaliados os processos utilizados e expostas possíveis investigações futuras dentro do mesmo tema.





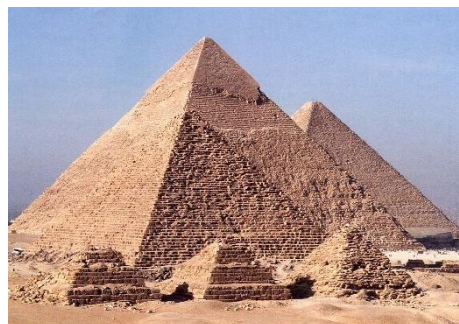


## **2. CONTEXTO HISTÓRICO\_**



## 2.1. INTRODUÇÃO

O método construtivo de um edifício varia, quase sempre, de acordo com a localização da construção, tanto seja pela matéria-prima presente, como pelos conhecimentos adquiridos pelos artistas, mas maioritariamente, essas diferenças devem-se ao período histórico da concepção. Há cerca de 5.000 anos atrás, onde a tecnologia mais avançada, não passava de uma cunha de madeira e água para rachar a pedra. Não obstante, os Egípcios construíram as grandes pirâmides de Gizé (figura 2.1), através de inúmeros escravos, empilhando massivos blocos de pedra talhados com as medidas exatas e só então transportados para o local da construção, por meios humanos e animais. Durante séculos na Arquitetura e construção de monumentos, foi este o método utilizado. Todavia, num outro contexto foi utilizado um material, igualmente empilhado, ainda que, não trabalhado por meios subtrativos, o tijolo. Produzido por meios de moldagem de argila e secagem ao sol, foi um material, tal como a pedra, utilizado em monumentos. Segundo Francisco Andrade (1995), o Palácio de Ctesifonte (figura 2.2), foi construído em tijolo e reverenciado pela sua abóbada com cerca de 30 metros de altura, 26 de largura e 52 de comprimento, é ainda hoje considerado o palácio com a maior abóbada não reforçada em tijolo. Contudo, não só em países onde a mão-de-obra é abundante e barata, são encontradas obras que recorrem ao uso do tijolo. Também em Portugal, podemos assistir a construções equiparadas, porem mais modestas e com um intuito pouco estrutural.



*Figura 2.1 - Pirâmides de Gizé, Egípto.*



*Figura 2.2 - Abóbada do Palácio Ctesifonte, na cidade de Salman Pak no Iraque.*



*Figura 2.3 - Abóbada Alentejana em fase de construção.*



*Figura 2.4 - Vista da Entrada do edifício do CAUP/Planetário do Porto, com a "barriga" do edifício (uma parte da abóbada interior).*

Tomando como exemplos a construção de abóbadas em tijolo à vista no Alentejo (figura 2.3) e a “barriga” na parede exterior do Planetário do Porto (figura 2.4), podemos afirmar que, também em Portugal, a construção de formas geométricas complexas em alvenaria está presente, contudo a alvenaria simples e plana foi o processo mais utilizado para a edificação de abrigos muitas vezes meramente funcionais.

Estas diferenças ao longo da História distinguiram formas arquitetónicas e tradições tectónicas de um lugar para o outro. Ao longo do tempo, foi também incrementado, de geração em geração, um conhecimento de construção, bem como uma capacidade de execução melhorada, mas ainda com uma margem de rigor muito baixa. Esta margem de erro devia-se principalmente às ferramentas arcaicas e a métodos de construção pouco rigorosos, onde muitas vezes eram usados apenas palmos ou varas para as medições e utensílios em madeira.

No entanto, na atualidade não é justificável a falta de rigor e o trabalho árduo para a materialização de qualquer tipo de elemento. As ferramentas disponíveis estão cada vez mais acessíveis e de forma simplificada. O mesmo se verifica na Arquitetura e na própria Construção onde o recurso à fabricação digital fomenta a eficiência e a precisão de como são construídos os edifícios.

Este capítulo tem como objetivo expor a evolução do processo de fabrico do tijolo e ainda apresentar, segundo a perspetiva Deplazes (2005), a sequência da construção em alvenaria.

## 2.2. EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO

O tijolo tem sido usado há mais de 9.000 anos, como afirma Gramazio e Kohler (2008), mas nem sempre foi como o conhecemos na atualidade. Os tijolos feitos por moldagem de uma massa de argila e água (figura 2.5), que por sua vez eram endurecidos por secagem ou queima, estão entre os materiais mais antigos e de maior longevidade alguma vez usados pela Humanidade. Até muito recentemente, o barro era escavado, os tijolos moldados, cozidos e transportados por meios manuais, com ajuda animal. Embora, em alguns países subdesenvolvidos, este tipo de fabrico ainda continue a ser explorado, devido à abundância de matéria-prima e de mão-de-obra muito barata. Apesar da existência de engenhos que facilitam a moldagem e secagem da argila, esses meios, nos países acima descritos, continuam arcaicos e de fabrico artesanal. Por outro lado, nos países mais desenvolvidos, embora exista atualmente maquinaria automatizada para esta produção, somente há cerca de 100 anos apareceram as primeiras máquinas, capazes de produzir tijolos automaticamente (figura 2.6). Sendo um material antigo na sua evolução de fabrico, seria de esperar uma diferença notória entre o tijolo obsoleto e o tijolo atual. No entanto, o que torna este material tão interessante e abundantemente utilizado, é a sua simplicidade como afirma Rob Sovinsky (1999).

Atualmente, e com uma visão futura e ecológica, estão a ser projetados novos tipos de tijolo. Agora com auxílio



*Figura 2.5 - Método tradicional de fabrico do tijolo, ainda usado em países subdesenvolvidos.*



*Figura 2.6 - Método industrial de fabrico do tijolo, produção em massa e automatizada.*

das novas tecnologias é muito mais fácil atribuir novos materiais e novas formas a este conceito de empilhamento de elementos. Um dos exemplos de inovação ecológica do tijolo teve início com uma ideia dos coreanos Jin-young Yoon e Jeongwoong Kwon (Save Water Brick 2003), em utilizar dois resíduos e dar-lhes um novo uso (figura 2.7). O conceito envolve a pulverização de folhas de árvores e plástico, que posteriormente passa por um processo de moldagem a frio. Apesar de apresentar alguns custos na sua produção relativamente ao processo de queima, para a secagem de tijolos de argila, este processo não gera emissões nocivas para o ambiente. Os tijolos não só absorvem água, mas também permitem que ela esorra por umas vias desenhadas na face do tijolo. A água pode depois seguir para o solo ou então ser depositada em reservatórios para uso futuro.

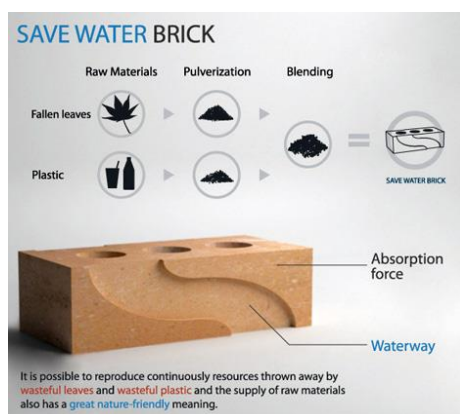


Figura 2.7 - Conceito de produção de um tijolo ecológico e que permite a recolha de água.



Figura 2.8 - Brick Biotope, bloco de betão de secagem rápida moldado com a intenção de proporcionar fendas e ninhos para pássaros.

Outro exemplo, apesar de ambientalista, não é tão ecológico como o anterior. Ainda assim, a ideia de duas estudantes holandesas, Micaela Nardella e Oana Tudose (Brick Biotope 2013), consiste em criar mais espaço no ambiente urbano para os pássaros. Uma vez que, os pássaros comuns de jardim têm sido, com o passar do tempo, expulsos do seu ecossistema devido ao crescimento exponencial das cidades. Apelidado de Brick Biotope, criaram um bloco moldado com betão de secagem rápida e areia, de forma a criar buracos e fendas (figura 2.8). Estes espaços permitem o crescimento de vegetação e recolha de água, bem como possibilitam a formação de ninhos para os pássaros. Uma outra virtude deste conceito é que, devido às dimensões padronizadas, estes blocos podem ser associados a outros tijolos



*standard* num nova construção ou até numa parede de tijolo existente.

O conceito do tijolo como elemento de construção tem vindo a ser usado, desde há muito tempo. Contudo, a sua história ainda não está completamente contada, uma vez que o futuro e o desenvolvimento de novas ideias e tecnologias proporcionarão a este componente construtivo uma nova posição no caminho da Arquitetura.

## 2.3. SEQUÊNCIA DE CONSTRUÇÃO

Em qualquer processo manual, com uma determinada finalidade, é antecipadamente pensado o seu progresso desde o início até à conclusão. O mesmo acontece na construção em alvenaria de tijolo e que, segundo Deplazes (2005), consiste numa sequência da construção arquitetural, por meio de um sistema aditivo em cinco etapas (figuras 2.9 a 2.13):

Inicia nas Matérias-primas, nesta categoria, tipos diferentes de materiais são distinguidos por quatro categorias: Flexibilidade; Plasticidade; Resistência e Densidade. Devido às suas propriedades, cada uma das quatro categorias pertence a uma certa habilidade técnica ou classe: Arte têxtil; Arte cerâmica; Tectónica (carpintaria) ou Estereotomia (alvenaria). Deplazes (2005) enfatiza que isto é baseado na ideia de “*Cada técnica, tem por assim dizer, o seu material de eleição que proporciona os meios mais convenientes para a produção de formas que pertencem aos domínios originais.*”.



Figura 2.9 – “Raw materials”- Mistura da argila com a areia e a água.



Figura 2.10 – “Modules”- Produção natural, secagem ao ar, Paquistão.



Figura 2.11 – “Elements”- Ruínas encontradas no Líbano, de uma casa em tijolo.



Figura 2.12 - “Structures” - Edifício em tijolo em fase de construção.



Figura 2.13 - “The structure”- Edifício KNSM- Elland de Hans Kollhoff, Amesterdão.

O próximo passo na sequência de construção é apresentada por Deplazes (2005) como, os Módulos, peças individuais ou blocos, formam o mais pequeno e básico dos componentes de uma construção. Divididos pelo autor acima referido em: Alvenarias trabalhadas como as pedras; Terras moldadas e cozidas como os tijolos e ainda, os componentes de madeira preparados em elementos padronizados. Todos estes módulos, segundo Deplazes (2005), apresenta as suas próprias tectónicas, os seus princípios de junção, que são expostos na próxima etapa de construção.

Os Elementos, sendo uma composição organizada de módulos, representam de certa forma, um produto semi-acabado (paredes, tetos e pavimentos). Nesta fase, tornam-se evidentes os problemas de produção e de aglutinação dos módulos. Para tal Deplazes (2005), explica que esses problemas podem ser resolvidos, de certa forma, com soluções simples. Para dificuldades horizontais, são acrescentadas juntas de dilatação. Nos problemas verticais a solução passa por, acrescentar mais espessura nas paredes inferiores e decrescer essa medida, cada vez que se aumenta a altura do edifício.

A penúltima etapa Estruturas, resultado de uma formação de elementos. Nesta categoria estão também presentes a divisão espacial do edifício, bem como as infraestruturas verticais e horizontais.

Finalizando com A Estrutura, engloba o processo e o resultado dividido em: Edifício – resultado final da construção, com todas a estruturas e infraestruturas; Projeto – recolha de informação, desde a ideia inicial até ao projeto de execução; Produção – sequência operativa e logística.

Esta cadeia de construção teorizada por Deplazes (2005), já se encontra presente na Arquitetura e na construção em tijolo desde as primeiras obras realizadas com este processo. No entanto, é de referir que, paralelamente ao processo padronizado da cadeia de construção, existe um tema intrínseco ao tijolo como elemento de justaposição, a sua disposição.

Existem diversas formas de justaposição de tijolos, algumas associadas ao local de origem, outras a estilos artísticos. Mas de forma a entender estes estilos é necessário ter em conta, que o tijolo possui várias faces e pela posição que se encontra na fachada é atribuída uma nomenclatura diferente (figura 2.14) assim como o tipo de corte executado como aponta Sovinski (1999).

Algumas destas terminologias deram nomes a estilos de montagem como por exemplo “*Header Bond*” (figura 2.15), também conhecido como “*Common Bond*”. Pfeiter (2001) destaca que, esta classe é a mais recorrentemente encontrada, mas também a menos eficiente, uma vez que, não inclui travamentos na sua composição. Entre outros (figuras 2.18 e 2.19), o estilo “*English Bond*” tal como o nome indica, tem o seu auge no sul da Inglaterra, considerado por Pfeiter (2001), o mais sóbrio e mais preponderante dos estilos. Afirmo ainda que, com a habilidade de artesãos experientes, são conseguidos resultados de grande complexidade. A Igreja Católica de Güstrow, desenhada por Paul Korff-Laage, apesar de não se encontrar na Inglaterra é um ótimo exemplo da capacidade formal e tectónica deste estilo (figura 2.20).

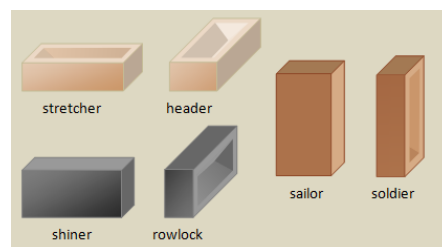


Figura 2.14 - Nomenclaturas dadas ao tijolo, referentes à posição apresentada na fachada.

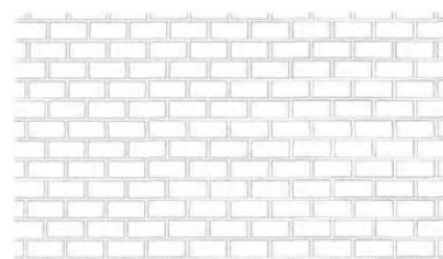


Figura 2.15 - Estilo Comum - Header Bond.

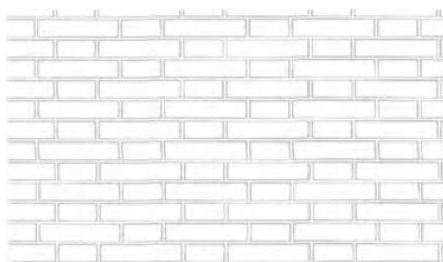


Figura 2.18 - Estilo Gótico - Gothic Bond.

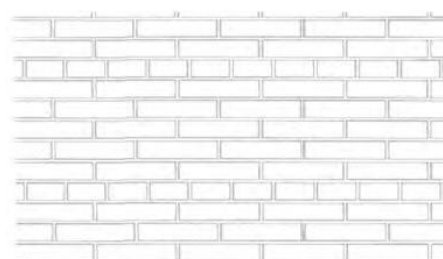


Figura 2.19 - Estilo Americano - American Bond.



Figura 2.20 - Igreja Católica de Güstrow, desenhada por Paul Korff-Laage, Alemanha.

## 2.4. LIMITAÇÕES

Em qualquer tipo de construção complexa é requerido um enorme esforço em termos de mão-de-obra e de tempo, mas no que ao uso do tijolo em formas complexas diz respeito, o trabalho intensivo e o consumo de tempo são exponenciados. Inicialmente, devido às suas restrições funcionais e estruturais, este tipo de construção leva os arquitetos a terem que detalhar os desenhos ao nível da unidade. São requeridos desenhos de obra e de projeto, onde estejam presentes todos os elementos e a distância exata entre eles. De outra forma, os alinhamentos dos vãos e juntas de dilatação não coincidiriam. No entanto, estes elementos padronizados, através das suas dimensões e até da distância das suas juntas, acabam por predeterminar muitas vezes a forma do próprio edifício. Um outro problema relacionado com o processo de desenho de construções em alvenaria de tijolo é que, uma vez finalizados os desenhos de projeto e aquando da obra, caso seja necessário, torna-se impraticável a sua alteração. Estas alterações tornam-se impossíveis, principalmente em projetos mais complexos, onde a alteração de um tijolo pode desregrar toda a fachada. Apesar de desafiante e capaz de resultados interessantes, os entraves do processo de desenho, muitas vezes fazem o Arquiteto pensar duas vezes antes de utilizar este sistema construtivo.

Neste contexto, o principal problema associado a este sistema de construção, teve início aquando da industrialização e da produção em massa. A maioria dos materiais é então, fabricada de forma industrial, a partir



de uma linha de produção massiva, com o intuito de reduzir o preço do produto final. Além disso, o aparecimento de materiais como o betão tornaram o tijolo numa segunda alternativa ou muitas vezes num mero adorno de revestimento. Os materiais de produção industrial, onde se encontra incluído o tijolo, raramente são encontrados nas imediações do local da edificação. A maior parte é conseguida através de fábricas em zonas industriais localizadas, muito frequentemente, nas periferias e posteriormente transportados para o local de construção. No entanto, os materiais de produção industrial, não só limitam a solução final ao nível da forma, mas também aumentam a duração e o preço da construção devido à necessidade do transporte.

Para que a construção em alvenaria de formas geométricas complexas, ainda seja viável nos dias de hoje e de uma forma tradicional, são requeridos inúmeros artesãos com larga experiência neste tipo de construção. Para que as medições, cortes e as argamassas sejam executadas de forma correta é essencial uma completa e rigorosa compreensão dos desenhos de projeto. Mas como o erro é algo intrínseco ao Ser Humano, o processo de corte e de colocação da argamassa não são rigorosamente executados, assim como a comunicação entre os artesãos e o Arquiteto. Limitações estas que tornam, neste tipo de construção, as obras de geometria complexa pouco eficientes e bastante dispendiosas. Isto, tendo em conta o tempo, a mão-de-obra e os meios de transporte necessários para a sua concretização.

## 2.5. CONSIDERAÇÕES

Ao longo dos séculos e milénios, diversas abordagens foram tomadas, de forma a realizar o mesmo objetivo, a construção em alvenaria de tijolo. Umas mais simples, outras monumentais, contudo todas usaram os conhecimentos que foram passados de geração em geração, adicionando mais um pouco da sua genialidade. Paralelamente a este passar de conhecimento, diversas ferramentas foram inventadas e reinventadas para suprir as necessidades que o processo construtivo acarretava. Hoje, e tomando como exemplo as pirâmides de Gizé, passaram-se 5.000 anos de experiências e reinvenções, o que pode fazer-nos pensar que nada mais pode ser alcançado e que a tecnologia atual apenas nos pode facultar o que conseguimos fazer com ela. Todavia, daqui por mais 5.000 anos voltaremos a pensar o mesmo. Mas teremos evoluído a tal ponto que as nossas preocupações serão de outro nível e onde processo construtivo de um edifício poderá nem ser mais um desafio, visto que por essa altura poderemos ter já um controlo total dos elementos e matérias existentes.

No entanto, ainda vivemos no ano 2013 e os desafios construtivos são os estímulos que encorajam o Arquiteto a chegar cada vez mais longe. Com o intuito de proporcionar ao mundo, mas principalmente ao ser humano, sensações de conforto e segurança, aliadas a formas harmoniosas capazes de dialogar com o espaço envolvente. Ao mesmo tempo esta procura de mais e melhor, está positivamente, ligada com economizar ao máximo os recursos existentes e poupar o Meio Ambiente, que por agora é o único que possuímos.



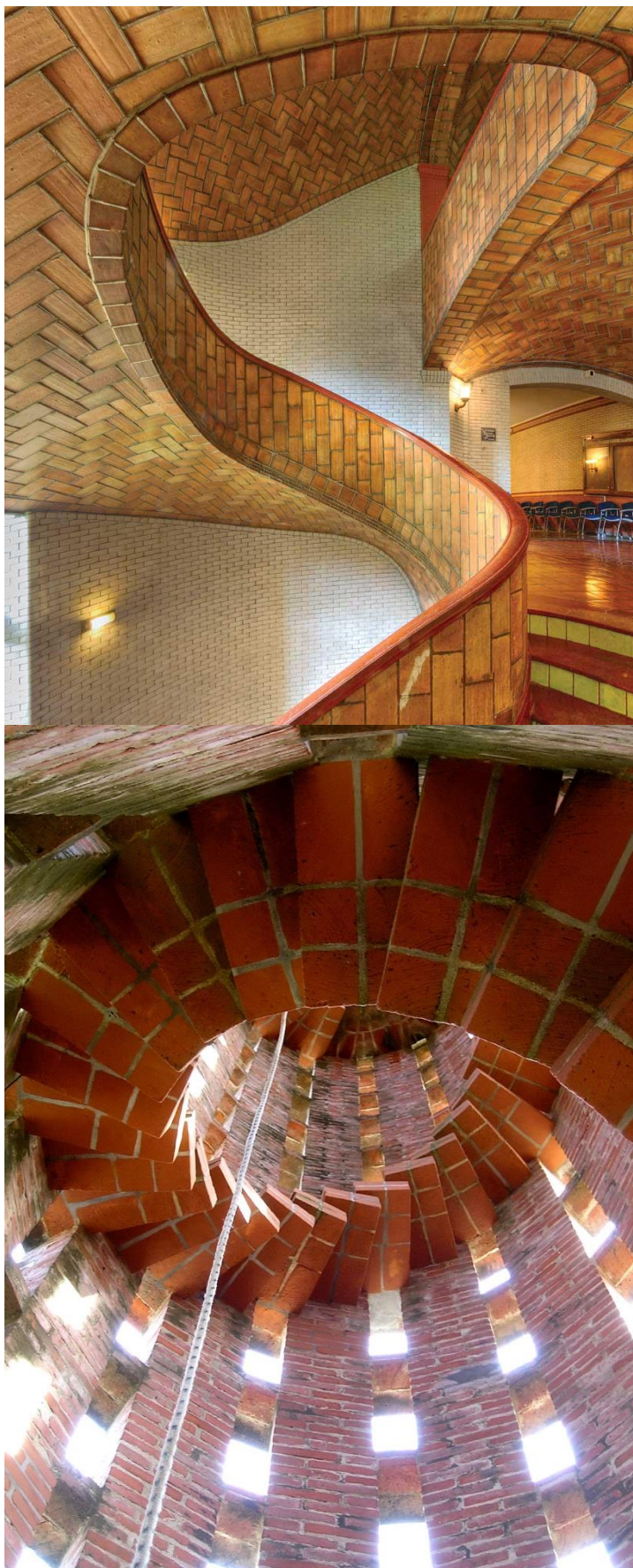




### **3. OBRAS DE REFERÊNCIA DE ARQUITETURA EM TIJOLO\_**

### 3.1. INTRODUÇÃO

A construção em alvenaria de tijolo, apesar de possuírem diversas limitações e entraves desde a concepção da ideia ao produto final. Deixaram ainda os seus marcos na História da Arquitetura e demonstram ser a alma das obras de alguns ilustres arquitetos, tais como, Rafael Guastavino, Eládio Dieste, entre outros, que redescobriram as potencialidades do tijolo e dos métodos associados a este tipo de construção. Muitos outros ficaram fascinados com as potencialidades do tijolo e com a sua plasticidade em termos de forma e estrutura, mas é de salientar que nestes casos em particular, o tijolo foi usado para além da sua ortogonalidade e pensado a partir do todo e não são da unidade. Tal como na Natureza, o tijolo é tido como uma célula que compõe algo maior. Os autores acima referidos exponenciaram este tema de organicismo e complexidade para as suas obras, resultando em construções de tijolo ímpares. Obras que exploram a máxima plasticidade, possível de ser obtida por meios manuais e com este elemento padronizado que é o tijolo. De seguida, serão então analisadas as obras de “St. John the Divine” do Arquiteto Rafael Guastavino, a Igreja de Cristo Obreiro de Eládio Dieste, o museu MARTa Herford de Frank O Gehry e Tongxian Gatehouse dos arquitetos Monica Ponce de Leon e Nader Tehrani.



*Figura 3.1 - Diferença entre a construção de Guastavino e Dieste, apesar de datar de uma época diferente a construção de Guastavino, possui um acabamento mais requintado.*

### 3.2. RAFAEL GUASTAVINO: “ST. JOHN THE DIVINE”

Rafael Guastavino Moreno (1842-1908) (figura 3.2) nasceu em Valência e estudou na “*Escuela de Maestros de Obras*”, em Barcelona (1861-1866). Guastavino (1893) relata que o rápido crescimento da indústria na Catalunha, na segunda metade do séc. XIX, requeria um sistema de construção para edifícios com grandes vãos livres, mas que ao mesmo tempo combinasse as considerações económicas e as medidas de segurança contra incêndios. Ciente do paradigma da construção da época, Guastavino desenvolveu um sistema híbrido, aplicando em coberturas a segurança e robustez das paredes de tijolo. Contudo, o sistema de Guastavino diverge um pouco do restante tema, uma vez que, o tijolo usado era um pouco diferente (figura 3.4). No entanto, é de salientar, que o seu método ainda hoje pode ser encontrado em alguns edifícios em Espanha, apesar de a maioria do seu trabalho se ter difundido pelos Estados Unidos da América, a partir de 1881, ano em que se mudou para Nova Iorque. Um dos exemplos mais expressivos da técnica de Guastavino foi a construção da abóbada de “St. John The Divine” (figura 3.5). Este método, denominado de abóbada catalã, foi usado como cobertura provisória da catedral, por se tratar de uma solução rápida e económica. Ainda assim, apesar de ser uma construção interina, continua presente e em perfeitas condições, desde 1909, data da sua conclusão. Lisa Mroszczyk (2004), descreve este sistema de Guastavino



Figura 3.2 - Rafael Guastavino Moreno.



Figura 3.3- Teste de capacidade de carga de uma abóbada catalã.





Figura 3.4 - Tijolo utilizado nas abóbadas de Guastavino, mais fino, ainda hoje é utilizado como decoração em falsas fachadas de tijolo a vista.



Figura 3.5 - Catedral de "St. John The Divine, Nova Iorque.

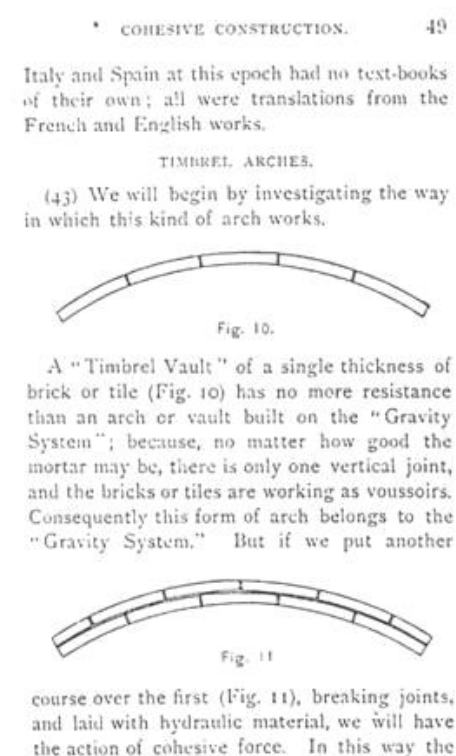


Figura 3.6 - Diferença estrutural entre uma abóbada convencional e as abóbadas construídas através de um processo de adesão.

- "*Cohesive Construction*", ou seja, uma construção por adesão dos materiais, em oposição ao atrito que era, até então, de uso mais comum. As abóbadas de construção por adesão são compostas por várias camadas de tijolo e argamassa e podem ser caracterizadas pela espessura, robustez, dupla curvatura e pelas suas propriedades não combustíveis.

Guastavino (1893), elucida a diferença entre os dois sistemas no seu Tratado de história e teoria de construção por adesão, aplicada especialmente às abóbadas catalãs, mostrando assim as vantagens de uma construção por este método, dentro das quais a sua enorme capacidade de carga e a resistência ao fogo, uma vez que a argamassa de junção era também usada na construção de fornos de lenha. As abóbadas catalãs - "*Timber Vault*" também conhecidas como abóbadas de tambor são provenientes da Estremadura de Espanha mais propriamente a região fronteiriça com o Alentejo como aponta Manuel Luna (2003) A ilustração (figura 3.6) revela claramente que, numa abóbada com um alinhamento de tijolos e apenas uma junta vertical, é unicamente a gravidade e o atrito que mantem os elementos no lugar. Segundo Guastavino (1893), adicionando uma segunda camada com o tijolo desfasado e unindo com argamassa, reduz-se drasticamente o peso em relação a uma abóbada similar. Proporcionando também uma maior capacidade de carga devido á adesão dos materiais. Este tipo de construção, na sua forma mais comum, usa muito pouco ou nenhum ferro. Aplicada com um tipo de argamassa de secagem rápida, reduz o tempo e o custo de construção comparativamente com as abóbadas de alvenarias convencionais.



### 3.3. ELÁDIO DIESTE: IGREJA DE CRISTO OBREIRO

Um outro autor reconhecido pelo investimento no desenvolvimento da arquitetura em tijolo foi Eládio Dieste Saint Martin (1917-2000) (figura 3.7), formou-se em 1943, com o título de engenheiro, na faculdade de engenharia de Montevideo, como narra Mercedes Chirico (2012). Produziu uma obra de carácter único, em vários países da América Latina, expressando sempre a sua vontade de inovar. Dieste, a partir de uma opção construtiva simples, o tijolo cerâmico, que usado com um profundo conhecimento estrutural, possibilitou a construção de uma arquitetura com formas ousadas, onde o espaço e estrutura são indissociáveis. O artista, projetou vários edifícios com paredes regradas de cerâmica armada. O primeiro e por conseguinte, mais ilustre exemplo construído com este sistema data de 1960 e é a célebre Igreja do Cristo Obreiro, na cidade de Atlântida (figura 3.8).

As paredes de superfície regradada, além de conformar os limites físicos dos espaços, são parte integral e fundamental da estrutura. Este género de parede é sempre usado, nas construções de Dieste, como elemento estrutura e de sustentação. Geometricamente, afirma Cláudio Román (2012), essas superfícies são construídas movimentando-se uma reta entre uma geratriz horizontal e outra geratriz senoidal, disposta também de forma horizontal separada uma da outra (figura 3.9). Em outras obras do artista, o mesmo método foi utilizado, mas a disposição das linhas nesses casos eram diferentes,

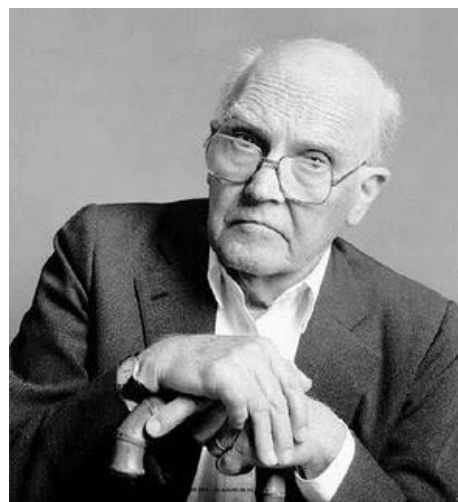


Figura 3.7 - Eládio Dieste Saint Martin.



Figura 3.8 - Igreja de Cristo Obreiro, Cidade de Atlântida.

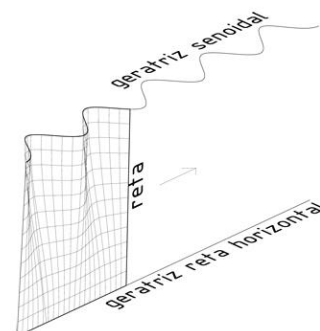
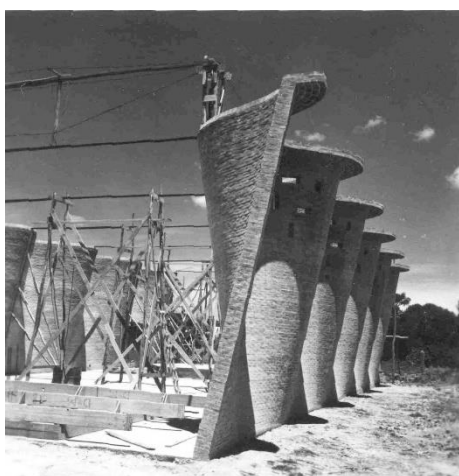


Figura 3.9 - Conformação de uma parede regradada.



*Figura 3.10 - Construção da parede dupla e estrutural com câmara da igreja de Atlântida.*



*Figura 3.11 e 3.12 – Fotos da construção da igreja de Cristo Obreiro, Atlântida.*



resultando em soluções geométricas distintas, mas ainda assim, com o mesmo sistema construtivo

À semelhança do sistema de Guastavino, o desenvolvimento de um projeto deste tipo, desde o desenho até a construção, é um processo incrivelmente desgastante. São requeridos trabalhadores altamente experientes, de forma a ajustarem a argamassa e alinharem os tijolos, o que torna o processo construtivo muito mais complicado. Em semelhança, também ao sistema de Guastavino, Dieste usa muito pouco aço na armadura das paredes. São constituídas por duas fileiras de tijolo em que o espaço resultante entre elas é completado com betão e a fina armadura de aço (figura 3.10). Nas coberturas, uma vez que apresentam quase sempre dupla curvatura o sistema construtivo, assemelha-se mais uma vez ao de Guastavino. Neste caso são usadas duas camadas de tijolo, sobre um molde em madeira e onde são depositados espaçadores para os blocos. Estes facilitavam a colocação regrada dos tijolos e a posterior aplicação da argamassa. A segunda camada é disposta desfasada sobre a primeira, concedendo a estrutura uma maior resistência contra às forças exercidas pelo vento, chuva e gravidade.

### 3.4. FRANK O. GEHRY: MARTa HERFORD

Incluído num vasto leque de obras, o museu MARTa Herford (figura 3.13) é considerado como o irmão mais novo do museu Guggenheim em Bilbao, Espanha, e o Arquitecto Frank O Gehry (figura 3.14) o seu pai. Nascido em Toronto, em 1929, e vivendo em Los Angeles, desde 1947, Gehry pertence a uma elite de arquitetos contemporâneos de referência. Aplicando os elementos característicos do seu estilo, numa cidade em Westphalia, tornou Herford em mais um local de culto para os arquitetos de todo o mundo.

O tema do museu está dissimulado no acrónimo MARTa (M de “Möbel”, palavra alemã para mobiliário, ART de arte e a de ambiente). Projetado como o centro do equipamento mobiliário, o museu é tido como um núcleo de Arte Contemporânea, Arquitetura e *Design*. Para além, da sua capacidade multifacetada, formalmente apresenta dois níveis, onde as paredes das fachadas de tijolo continuo e a cor, marrom-avermelhada, referenciam o estilo arquitetónico industrial da região. Birgit Bastiaan e Hartwig Rullkötter (2005) explicam que, no nível inferior as paredes de betão armado (figura 3.15), desenvolvem-se onduladamente pelo edifício, assegurando as curvas necessárias para o revestimento em tijolo. Enquanto que, no nível superior uma estrutura em aço (figura 3.16) é forrada com uma placagem onde posteriormente, é adicionado um tipo de tijolo de espessura mais fina e por conseguinte, mais leve. Essas estruturas têm unicamente a função de captar luz zenital,



*Figura 3.13 - Vista superior do museu MARTa Herford do Arquitecto Frank O. Gehry.*



*Figura 3.14 - Arquitecto Frank O. Gehry.*



Figura 3.15 - Parede de betão armado do nível inferior, antes do revestimento de tijolo.

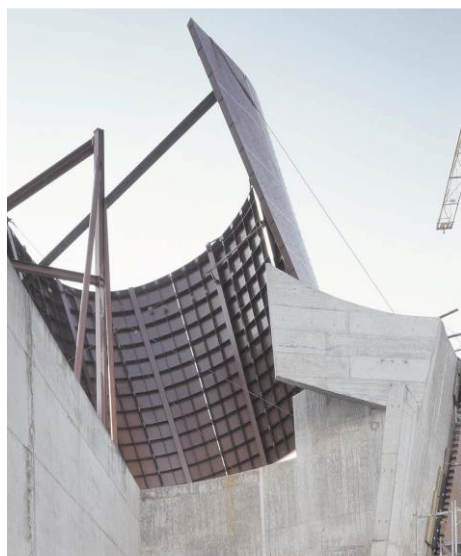


Figura 3.16 - Estrutura metálica do nível superior.

Figura 3.17 - Cobertura em aço inoxidável, cria um paradoxo entre o peso do tijolo e a leveza visual.

de forma a proporcionar um ambiente de luz natural e difusa nas exposições. Ainda, Birgit Bastiaan e Hartwig Rullkötter (2005) demonstram que o uso de aço inoxidável (figura 3.17) para a cobertura trouxe uma mais-valia à obra, aligeirando o peso visual que o tijolo exerce, resultando numa plena harmonia de formas e contrastes.

Todavia, o autor entende que esta abordagem ao uso do tijolo, fica um pouco reprimida, uma vez que o seu uso se limitou a mascarar um outro material. Enquanto, nos casos anteriores, principalmente no exemplo da igreja de Atlântida de Eládio Dieste, o tijolo enquadrava a própria sustentação e ao mesmo tempo servia de revestimento interior e exterior, o mesmo não acontece aqui devido ao uso das paredes de betão armado para configurar as curvaturas. Todavia a plasticidade atribuída a estas paredes em tijolo revelam uma importância acrescida relativamente ao que é possível alcançar com um elemento *standard* e de formas rectificadas.





### 3.5. OFFICE dA: TONGXIAN GATEHOUSE

Monica Ponce de Leon e Nader Tehrani (figura 3.18) fundaram o escritório de Arquitetura Office dA em 1991, que deu asas ao projeto “*Tongxian Gatehouse*”(figura 3.19), como primeira de múltiplas estruturas para uma colônia de artistas em Tongzhou, Beijing, China. Ponce de Leon e Tehrani (2002), descrevem que, o uso do tijolo neste projeto teve um carácter decisivo, tanto quanto à sua estrutura e forma, como ao seu acabamento exterior. Desse modo, assegurando uma relação imediata entre o estilo de montagem, a disposição e o efeito final (figura 3.20).

Neste caso, as geometrias complexas não são o objetivo, sendo que, a textura e a mudança de uma superfície para outra têm maior importância. Tal como nos casos anteriormente descritos, a unidade de construção é o tijolo. Porém, nesta obra o tijolo, contrariamente a um estilo comum, está disposto em estilo flamenco. A rotação e o afastamento dos tijolos conferem à fachada uma imagem de robustez e ao mesmo tempo é incutida uma plasticidade única proveniente da tectónica do tijolo. Em algumas zonas, as paredes verticais tendem a ter uma ligeira inclinação, de forma a criar tensão nos espaços. Esta inclinação aumenta a plasticidade incutida ao tijolo, que associado com a cor acinzentada, coloca o



Figura 3.18 - Monica Ponce de Leon e Nader Tehrani.



Figura 3.19 - Vista lateral da Tongxian Gatehouse, onde estão presentes a maioria dos vãos.



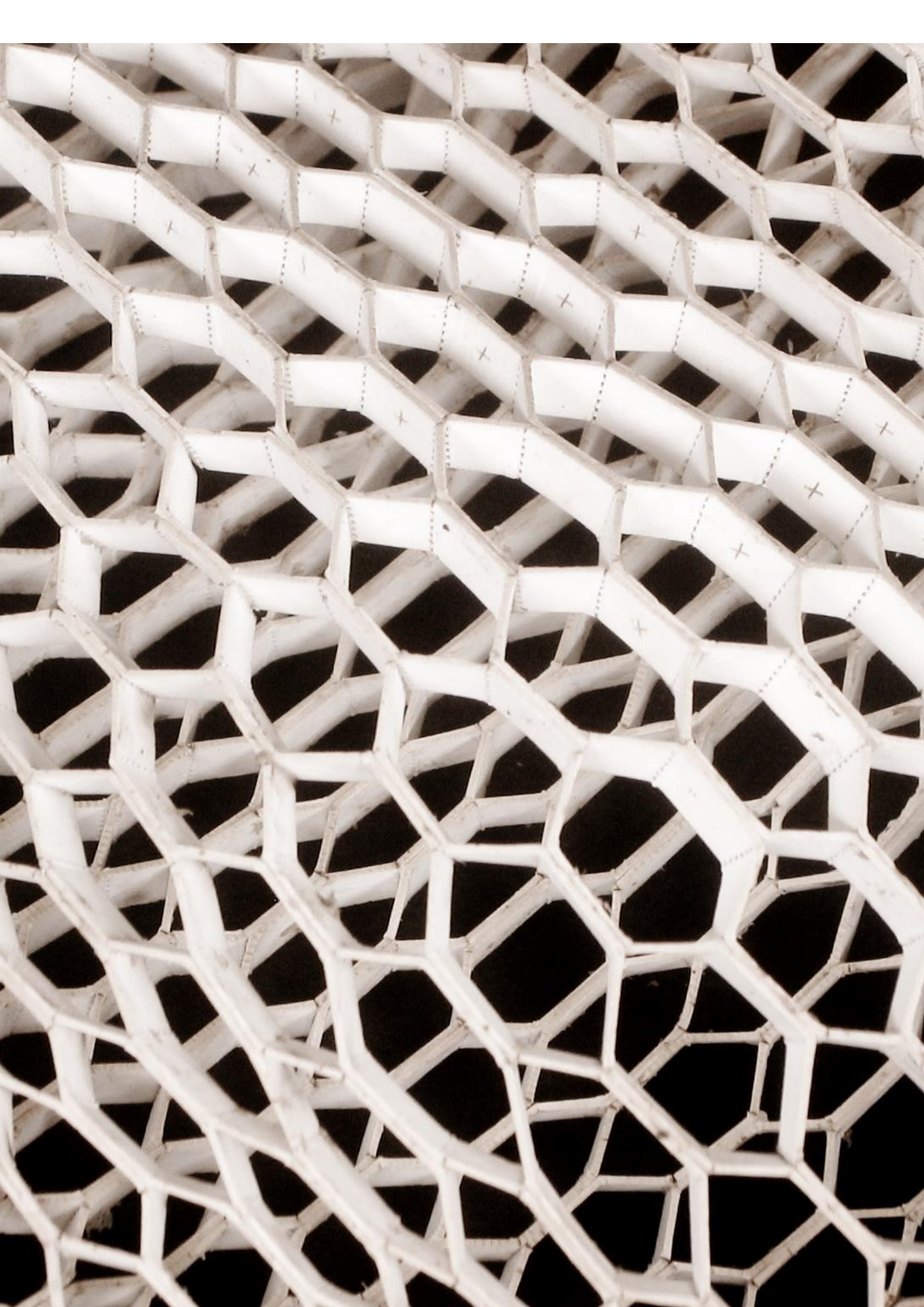
Figura 3.20 - Vista frontal e lateral, realçando a textura conseguida através da rotação e afastamento dos tijolos.

tijolo em pé de igualdade com o betão, pelo menos a um nível formal.

### **3.6. CONSIDERAÇÕES**

Um sistema construtivo, constituído por elementos minúsculos, comparativamente com a dimensão da obra, acarretou, desde sempre, um enorme desafio estrutural e de grande complexidade. Estes são impostos, á partida, mesmo na construção de um elemento simples, como uma parede plana. Todavia, os arquitetos anteriormente citados levaram este desafio ao expoente máximo. Uns criaram coberturas imponentes, outros retorceram paredes para alcançar as suas ideias e atribuíram relevo e textura a algo sem qualquer expressão. Para tal, fizeram transpirar inúmeros homens, com o intuito de verem concluídas as suas obras. Contudo, estas não se expressaram em plenitude com as suas ideias e nem sempre foi possível chegarem a um resultado específico. Muitas vezes a comunicação entre as ideias do Arquiteto e a destreza do Construtor, não era a melhor. Com isto, a pergunta que fica é. Como seriam as obras destes artistas se possuísem a tecnologia disponível atualmente? Possivelmente, a espetacularidade dos edifícios apresentados teria sido exponenciada e a complexidade dos mesmos ultrapassaria, uma vez mais, as tecnologias disponíveis.





## **4. FABRICAÇÃO DIGITAL\_**



## 4.1. INTRODUÇÃO

Todos os dias, nos deparamos com uma inovação a nível tecnológico, tanto seja no setor da saúde, como na informática. O mesmo ocorre no setor da Arquitetura e Construção, onde novos materiais são conseguidos e novas soluções construtivas são apresentadas para dar asas à imaginação dos arquitetos. Neste contexto, o autor entende que a alvenaria convencional poderá ser melhorada através da utilização destas novas tecnologias e de robôs. Sendo assim, para o desenho de alvenaria, a modelação paramétrica tornará os desenhos 2D desnecessários, pois cada unidade é controlada pelos seus parâmetros que depois são traduzidos para dados numéricos precisos lidos pela maquinaria digital.

Existem ainda diversas semelhanças entre os processos convencionais de construção em tijolo e os métodos de fabricação digital, por esse motivo, as ferramentas digitais e as técnicas associadas podem ser introduzidas como complemento da obra em alvenaria. Os tijolos cerâmicos e os blocos de cimento são produzidos através da mistura de matérias com água e pelo endurecimento em molde, podendo ser considerado um processo aditivo de fabricação. A pedra e o bloco maciço de betão podem ser moldados na forma desejada, através de processos de fabricação subtrativos. Assim sendo, desde que as ferramentas de fabricação digitais sejam controladas por

dados numéricos a partir de um modelo de desenho computacional, o trabalho de corte e colocação de argamassa podem ser severamente reduzidos.

Gramazio e Kohler (2008) apontam, tal como Deplazes (2005), que o processo construtivo é composto por uma sequência de passos. Estes não são normalmente arbitrários, sendo que são colocados um após o outro até à conclusão. Fazendo agora a analogia a um computador, qualquer que seja o objetivo a ser alcançado, é necessário um processamento de dados numa sequência individual de cálculos. Aquando da construção de uma parede em tijolo, o operário agarra o tijolo de um lugar e move-o para aplicar a argamassa e logo depois, coloca-o no local devido na parede. Utilizando o *savoir faire* do processo construtivo, o Arquiteto pode programar e executar a mesma sequência de tarefas, através de um robô industrial. Estes podem operar continuamente durante 24 horas por dia, 7 dias por semana, a alta velocidade, ainda assim, é possível manter um elevado grau de rigor, mesmo com complexos padrões de distribuição.

O presente capítulo fornece uma revisão do panorama atual das tecnologias digitais disponíveis capazes de assistir o processo de desenho e de fabricação. Visto que, as possibilidades arquitetónicas dependem da representação e dos métodos construtivos escolhidos pelos arquitetos, tal como apresentado no capítulo anterior. Esta pesquisa concentra-se nas tecnologias, que o autor entende serem capazes de proporcionar novas perspectivas ao Arquiteto contemporâneo.

## 4.2. DESENHO COMPUTACIONAL

O desenho computacional – CAD, segundo Ibrahim Zeid (1991), tem como principal objetivo, converter em geometrias o desenho de projeto, para tal nos últimos 50 anos, diversas técnicas têm vindo a ser desenvolvidas para alcançar esse propósito. Atualmente, estas técnicas são capazes de produzir desenhos 2D e modelos tridimensionais, são ainda capazes de simular e analisar estruturas. Contudo, nem todas estas técnicas são aplicadas à Arquitetura e ao processo de desenho. Dentro de outras, o autor entende que, o desenho paramétrico e o algorítmico são os que mais se adaptam as necessidades do Arquiteto.

O desenho paramétrico, considerado um desenho assistido por computador e também conhecido como Geometria Associativa, segundo Mike Burry (1997). Ao contrário do desenho computacional direto, onde as ações tomadas são estagnadas, este processo requer uma representação de formas, onde a geometria é controlada por parâmetros e relações entre características de modelação. Estes parâmetros, podendo ser alterados, tornam este sistema numa mais-valia ao processo de desenho. Uma vez que, não é necessário um recomeço para atingir novas soluções, bem como a possibilidade de alcançar resultados não esperados à partida. Um outro aspeto importante, referente a este método de desenho computacional, tem a ver com, a descrição matemática das geometrias. É possível então, a criação de modelos digitais com rigor suficiente para serem incluídos em processos de fabricação digital. Este tipo de desenho

paramétrico, raramente é apresentado em apenas um *software*, na maioria dos casos, faz parte de um conjunto de aplicações de um *software*, facilitando assim, não só a continuidade do processo de desenho, mas revolucionando também a complexidade possível de ser atingida num projeto de Arquitetura.

Um outro tipo de desenho computacional é conhecido por desenho algorítmico, que consiste num processo de desenho associado à programação computacional. Ao contrário do desenho paramétrico, onde podemos criar e manipular as geometrias diretamente no ecrã, neste sistema o Arquiteto necessita de escrever uma série de instruções em linguagem de programação. Essas instruções ditam as variáveis, as funções e definições das geometrias. Após serem criadas as condições, por meio dos comandos de programação, é usado o poder de processamento do computador para gerar a geometria programada. Contudo, este sistema em Arquitetura é usado com moderação uma vez que os seus resultados tendem a ser não pré-determinados e o Arquiteto tem que balancear entre o objetivo e o subjetivo, o científico e o artístico.

Estes dois sistemas podem ser resumidos pelas suas diferenças. Num sistema paramétrico o ambiente de trabalho é visual e baseado em geometrias, enquanto o algorítmico é apenas texto. No primeiro, são decorridas ações de modelação de objetos virtuais e em tempo real, enquanto que, no segundo são dadas instruções sobre a forma de linguagem de programação e o resultado é apenas conseguido após o processamento do computador.

Uma outra vertente do desenho computacional, recai sobre os processos de manufatura ou fabricação – CAM (Computer Aided Manufacturing), este sistema, segundo Kunwoo Lee (1999), faz uso do poder computacional, para planejar, gerir e controlar operações de fabricação, através de interfaces diretas ou indiretas. Enquanto, os processo CAD estão mais direcionados para o desenho da geometria, o processo CAM está diretamente ligado como a materialização dos modelos, dispersando-se por diversas áreas. Dentro destas podemos encontrar: O Controlo Numérico (CNC), que consiste em dirigir meios de fabricação, como as fresas, corte, furação, dobragem, etc...Podendo também encontrar os Robôs, onde neste caso é programada uma ação, que por sua vez é executada pelo robô, como montagem, transporte, soldagem, etc...

O principal objetivo deste sistema computacional, é que a partir de um *software* e de um modelo tridimensional, que se intente fabricar, seja possível criar um caminho otimizado de fabricação relacionado com o tipo de maquinaria que será utilizado. Ao exemplo de uma processo subtrativo, como veremos de seguida, um sistema de fresagem, necessita de um código gerado por CAM (figura 4.1), de forma a que a máquina possa remover o material a uma velocidade suficientemente rápida, para que o processo seja rentável e ao mesmo tempo lenta o suficiente para que não se destrua a fresa.

Estes métodos de desenho e programação, anteriormente descritos, fazem parte de um conjunto de ferramentas cada vez mais indispensáveis ao Arquitecto. O desenho paramétrico e algorítmico, abre asas a um novo mundo de soluções construtivas e também formais, muitas delas

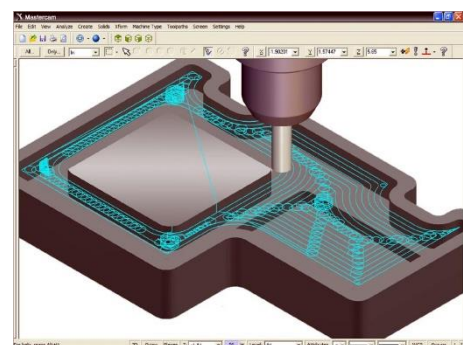


Figura 4.1- Simulação do caminho otimizado da fresa, para a fabricação de uma peça.

não pré-determinadas. A possibilidade de adicionar mais complexidade aos projetos arquitetônicos, mas ao mesmo tempo, racionar e economizar os recursos, traz de volta a máxima de projeto de Mies Van der Rohe de “*Less is More*”. Neste caso, não pela minimalidade da Arquitetura, mas pela quantidade de soluções que podemos obter com tao reduzida tecnologia.

Enquanto que a computação para otimização dos processos de fabrico facilita a comunicação e interatividade entre o Homem e a Máquina. Um outro processo é tão, ou mais, importante para que as ideias e modelos possam ser tornados realidade. A fase de maquinação é assim o próximo passo para uma conceção física e palpável dos modelos conseguidos com a computação digital. De seguida, será então abordado, em mais detalhe os tipos de fabricação digital disponíveis atualmente e como podem eles ser proveitosos no mundo da Arquitetura.

*Figura 4.2 - O National Swimming Center, Beijing, foi desenvolvido através de um processo algorítmico.*



## 4.3. TECNOLOGIAS DE FABRICAÇÃO

O *software* CAM tem como princípio a comunicação direta ou indireta com as diversas maquinarias, todavia, dentro deste leque de máquinas existe uma forma de as categorizar. Este conceito foi introduzido primeiramente em estudos por Branko Kolarevic (2000) e, desde então, tem vindo a ser muito bem aceite e usado em Arquitetura. Numa primeira parte, podemos encontrar dentro das técnicas de Fabricação Digital, os sistemas aditivos, subtrativos e formativos. Podendo depois ser ainda encontradas técnicas de Montagem Digital (montagem robotizada) e Construção Digital (construção aditiva).

Estas técnicas de fabricação digital, estão praticamente sempre ligadas com o uso de maquinaria pesada e industrial, movida ou programada por processos de desenho computacional, nomeadamente o CAM. É de salientar ainda, que o uso destes sistema, anteriormente era restrito a profissionais experientes neste tipo de maquinaria. Todavia, atualmente, cada vez mais estes métodos estão à disposição do Arquiteto e cada vez mais é nutrida a vontade de conhecer e trabalhar com as máquinas de fabricação digital.

São já inúmeros os escritórios que possuem as suas próprias impressoras 3D ou maquinarias de CNC, como máquinas de corte a laser e fresadoras. Esta necessidade deve-se principalmente ao aumento da demanda por peças únicas e personalizadas e ao mesmo tempo, o



baixo nível de investimento que este tipo de maquinaria acarreta, comparativamente à necessidade de enviar para fábricas especializadas para o fabrico das mesmas.

Como tal, a economia de tempo e de dinheiro, está a revolucionar o processo criativo, bem como o construtivo. Visto que, após a conclusão de um projeto é necessário passar para a escala real, é então aí que, as maquinarias industriais de dimensões muito superiores, são indispensáveis. Contudo, a dificuldade do transporte e de montagem continua a ser um dilema, que também pode ser solucionado com o auxílio de processos de fabricação digital.

De forma a melhor entender estes sistemas, seguidamente, serão apresentadas as tecnologias, que o autor entende como relevantes para a Arquitetura, para tal, será seguida a ordem de categorias apresentada por Kolarevic.(2003), alterando apenas a ordem das duas últimas categorias, de forma a dar seguimento para o capítulo seguinte onde será mais aprofundado o tema da montagem robotizada.

### 4.3.1. FABRICAÇÃO ADITIVA

A fabricação aditiva, envolve uma formação incremental acrescentando material, camada a camada, num processo inverso ao da fresagem. O princípio por trás de todas as tecnologias de fabricação aditiva é que o modelo tridimensional é fatiado em camadas bidimensionais. Kolarevic (2003) indica que, a informação de cada camada é transferida para o processamento da máquina e o processo é repetido até que todo o modelo esteja completo (figura 4.3). Contudo, devido ao processo de fatiamento, as curvaturas apresentadas não são realmente curvas. No entanto, como existem máquinas capazes de impressões de camadas tão finas como 0.01 mm, essas diferenças de camada para camada tornam-se praticamente impercetíveis. Devido ao tamanho limitado dos objetos que são possíveis criar com este método, é normalmente usado na construção para a produção de peças em série. Dentro deste sistema, existem distintos processos: Os baseados em líquidos, como a Estereolitografia (SLA) (figura 4.4) que consiste na secagem por meios de uma luz ultravioleta de uma camada de resina sensível a este espectro. Existem ainda os processos que recorrem a Pó, como a impressão tridimensional (3DP) (figura 4.5), em que o objetivo é em cada camada acrescentar uma porção de inerte, neste caso gesso e nessa mesma camada imprimir com tinta o contorno ou a forma pretendida. A junção do gesso com a tinta, acaba por formar um elemento sólido, onde é depois retirado o excesso de gesso não utilizado.

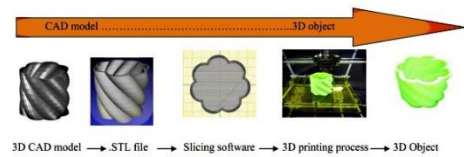


Figura 4.3- Processo de fabrico de um objeto tridimensional, desde a modelação até ao objeto real.

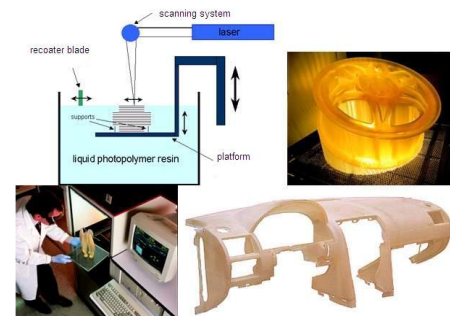


Figura 4.4 - Tecnologia de Estereolitografia (SLA).



Figura 4.5 - Tecnologia de impressão em gesso (3DP).

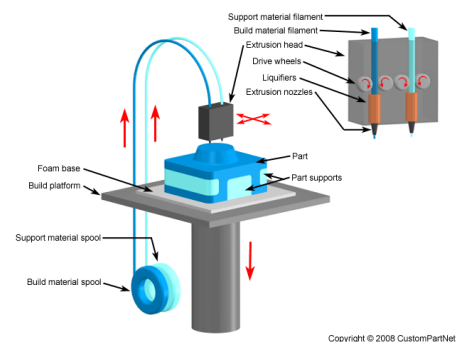
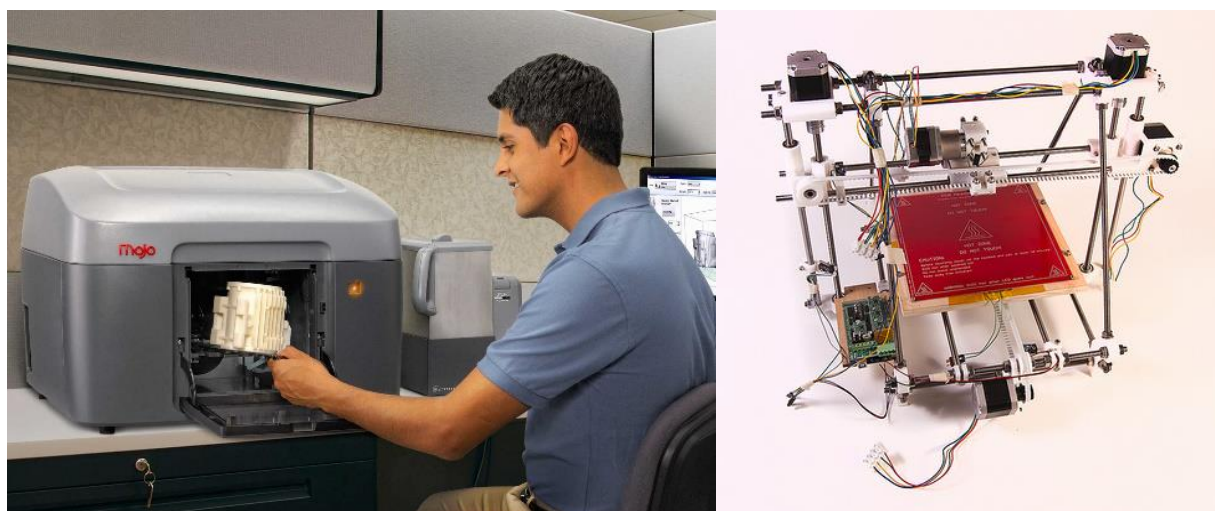


Figura 4.6 - Tecnologia de fusão a quente de plásticos (FDM).

Ainda existem processos sólidos de adição, conhecidos geralmente como *3D printers* ou FDM (Fused Deposition Modeling) (figura 4.6), estas consistem na fusão a quente de materiais como plásticos e *nylons* e que por sua vez são adicionados camada a camada até que o modelo esteja completo. Esta ultima técnica, está atualmente em expansão, devido ao uso de impressoras 3D pessoais, muitas conseguidas em *kits* pré montados, outros em projetos *DIY*, onde é o próprio consumidor que encomenda as peças necessárias para uma construção personalizada. Por intermédio destes meios de construção, e pela procura cada vez maior, são conseguidos preços muito baixos comparativamente a máquinas industriais ou comerciais. Como já foi referido anteriormente, a procura deste tipo de equipamento é cada vez maior, pelo simples fato do Arquiteto ou outro diligente, requerer peças de *design* único e personalizado.

Figura 4.7 -À esquerda uma impressora 3D comercial de alta definição, à direita uma Prusa 3D, impressora DIY, construída pelo utilizador, capaz de atingir definições de 0.01mm por camada, depois de bem afinada.



## 4.3.2. FABRICAÇÃO SUBTRATIVA

A subtração envolve a remoção de um específico volume de material sólido, usando um processo elétrico, químico, ou mecânico (fresagem multi-eixo). A fresagem pode ser restringida a um eixo, à superfície ou ao volume. Nas máquinas axialmente restringidas, como os tornos mecânicos (figura 4.8), a peça que irá ser fresada tem um eixo de movimento rotacional. Para a fresagem de sólidos tridimensionais é necessário a possibilidade de elevar ou baixar uma broca/fresa e movê-la ao longo dos eixos de  $x$ ,  $y$  e  $z$  (figura 4.9). Este tipo de maquinaria de 3 eixos apenas consegue remover material em profundidade. Existem ainda engenhos com 4, 5 e mais eixos para formas especiais e complexas, onde é possível a fresagem interna das peças (figura 4.10). Os programas de CNC controlam os movimentos, a velocidade do corte, as rotações por minuto da fresa, a refrigeração, as trocas de fresas e outros parâmetros operacionais.



Figura 4.8 - Torno mecânico CNC, capaz de produzir peças metálicas com elevadíssima precisão.



Figura 4.9 - Fresadora industrial de 3 eixos controlada por CNC.

Figura 4.10 - Fresadora de 5 eixos industrial, capaz de produzir peças maiores que automóveis.







Figura 4.11 - Torres Zollhof, do Arquiteto Frank O. Gehry, Alemanha.



Figura 4.12 - Fresagem dos moldes de esferovite, para as torres Zollhof.



Figura 4.13 - Enchimento dos moldes com betão armado.



Figura 4.14 - Processo de montagem dos painéis das torres Zollhof.

Como a fresagem das formas pode ser conseguida de diversas maneiras, gerando um apropriado “*toolpath*” (sequência de códigos calculados por computador com as instruções do trajeto da fresa e todas as outras operações). Por exemplo, as máquinas de fresagem multi-eixo são aplicadas na produção de moldes para peças de betão com dupla curvatura a serem fabricadas, fora ou no local da construção.

Assim foi feito nas torres Zollhof (figura 4.11), na Alemanha, pelo arquiteto Frank O. GEHRY (1999). As formas onduladas das paredes exteriores e de suporte foram produzidas em painéis de betão reforçado através de moldes de poliestireno (esferovite), para a produção de 355 moldes diferentes (figura 4.12 a 4.14) foi necessário calcular os trajetos no programa CATIA, um conceituado *software* no mundo do CNC, desenvolvido pelo escritório de Frank O. GEHRY (1999).

Apesar deste sistema de subtração ser apenas de contornos, sem recorrer a diferenças verticais, o corte bidimensional é um dos processos de fabricação mais comum. Várias tecnologias de corte, como arco de plasma, o raio laser e o jato de água, envolve dois eixos de movimento sobre uma folha do material relativamente à cabeça de corte. Existem sistemas onde o que se movimenta é a cabeça de corte, contrariamente a outros em que é a base, e existem ainda alguns que resultam da combinação dos dois. A diferença entre estas tecnologias consiste no tipo de material e na máxima espessura que a máquina está apta a cortar. Por exemplo, no pavilhão Dynaform (figura 4.15), a estrutura de suporte é baseada numa sequência ortogonal de 16 secções diferentes fabricada a partir de



folhas de aço. Mais de 30.000 peças foram produzidas usando uma máquina de corte a plasma. As linhas curvas foram calculadas usando um programa de CNC (Controlo Numérico Computadorizado) e soldadas manualmente com rígidas margens de tolerância, para formar as vértebras de aço do pavilhão, como elucidado Kolarevic (2003).



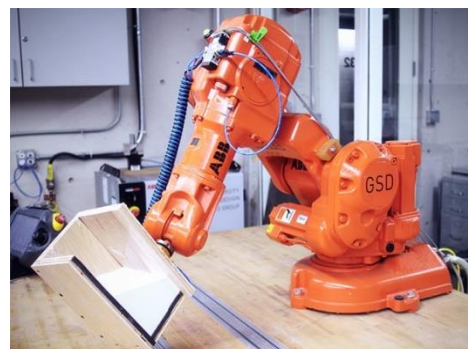
*Figura 4.15 - Estrutura do pavilhão Dynaform, cortada em CNC.*

### 4.3.3. FABRICAÇÃO FORMATIVA

A fabricação formativa tem como base a força mecânica (figura 4.16), para tal é aplicado calor ou vapor a um material, de forma a moldar o elemento na forma desejada. Segundo Kolarevic (2003), os planos como chapas metálicas, podem ser fabricadas através de processos CNC, tais como dobragem de tubos mecânica, ou através de braços robóticos aplicando rotação em vários pontos e destemperando o metal. Este processo de fabricação é, geralmente, dividido em dois materiais, o Metal e o Plástico. Contudo, cada material pode ser trabalhado nos seus três estados de matéria: Líquido; Plástico (não sendo considerado um estado, é um meio termo entre os outros dois) e Sólido. No metal em estado líquido podemos encontrar métodos de moldagem expansível, como os moldes de areia e de cerâmica e os não expansíveis, como os moldes de grafite ou de metal.



*Figura 4.16 - Fabricação de uma peça, por aplicação de força mecânica.*



*Figura 4.17 - Fabricação de um elemento através do posicionamento do molde e repouso por gravidade.*

No estado Plástico, o metal pode ser moldado por prensas pneumáticas, através de rolos ou até por extrusão direta. Ainda, no estado Sólido, o metal é passível de ser dobrado de diversas maneira, através de quineiras, por força de pressão de água ou ar e até mesmo por processos de estampagem em prensas pneumáticas.

Da mesma forma, o Plástico pode ser moldado, dobrado e extrudido. Todavia, o Plástico é possível ser moldado, estando no seu estado maleável, por meios de vácuo solidificando na forma do molde. Um outro método que pode estar incluso neste sistema, é o repouso posicionado de um material num molde (figura 4.17). Para tal, o material é depositado num molde ou recipiente e através do robô é aplicada uma rotação para que pela força da gravidade o material repouse e endureça na forma desejada.

Esta tecnologia de fabrico digital, ao contrário da fabricação subtrativa e à semelhança da fabricação aditiva, não possui resíduos do produto final a não ser os moldes, mas até esses podem ser reutilizados. Enquanto que, na fabricação subtrativa os resíduos não podem ser reutilizados diretamente, requerem sempre um processamento de aglutinação prévio.

*Figura 4.18 - Moldagem a vácuo de acrílico, usado como resguardo dos vãos do edifício, Vakko Fashion Center & Power Media Centre.*



### 4.3.4. CONSTRUÇÃO DIGITAL

O processo de construção digital, também conhecido como “*Contour Crafting*”, desenvolvido por Behrokh Khoshnevis em “*Information Sciences Institute of University of Southern California*”, tira partido das tecnologias de CNC e da fabricação aditiva para uma espécie de impressão tridimensional. Este modelo de camada a camada é muito semelhante ao método utilizado pelas impressoras 3D de menor escala (figura 4.19). Neste sistema, Kolarevic (2003), afirma que, o computador controla uma ponteira de onde é depositado um material, tal como plásticos, cerâmica ou até betão de secagem rápida, para formar um contorno e enchê-lo como um padrão de estrutura (figura 4.20). As principais vantagens deste tipo de fabricação são a velocidade de produção e a possibilidade de integração de outros métodos robotizados, para a instalação de componentes internos como tubagem, fios elétricos e a armação de aço para reforço, como aponta Kolarevic (2003).

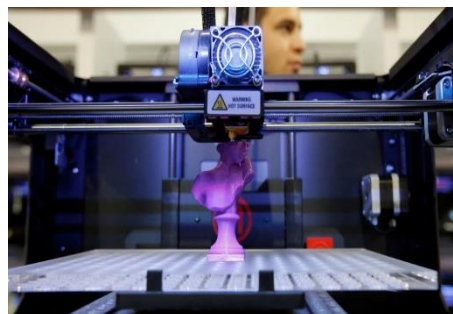


Figura 4.19 - Impressora pessoal 3D, fabrica peças a partir de fusão de vários tipos de plásticos.



Figura 4.20- Sistema Contour Crafting, depositando material camada a camada.

Figura 4.21 - Simulação tridimensional de um mega estaleiro de construção automatizada.





Sendo que esta técnica tem a possibilidade de integrar outros sistemas de fabricação para a produção de componentes, esta aplicação é proposta em Arquitetura como uma mega impressora 3D. Seria necessário uma grua controlada por CNC, uma ponteira enorme, um sistema de descarga de betão e outros sistemas robotizados para que tal fosse possível (figura 4.21). Como este procedimento é capaz de construir a grande velocidade e com formas livres, a sua aplicação à construção poderá ir desde habitações de emergência em casos de cataclismo, casas de baixo orçamento ou até potenciais colónias lunares (figura 4.22).

Este sistema, apesar de não usar o tijolo para a construção, apresenta uma possível solução alternativa para a construção de abóbadas e outras geometrias de geometria complexa. Isto, associado à ausência de suportes, revoluciona o processo construtivo, no que diz respeito a economia de meios e de tempo. Similarmente a Phillipe Block, como iremos ver posteriormente, este processo tem como principal objetivo uma construção rápida, de baixo custo e de fabricação automatizada.

*Figura 4.22 - Conjetura da possibilidade de construção automatizada de uma colónia lunar.*



### 4.3.5. MONTAGEM DIGITAL

Vários tipos de robôs industriais têm sido experimentados para dar resposta a diferentes trabalhos de fabricação, como cortar, soldar e/ou montar peças. Os braços robóticos, segundo Krouse (1982), são máquinas muito versáteis capazes de: selecionar e posicionar peças para máquinas CNC; carregar equipamento de um ponto para outro; agarrar e operar fresas, soldadoras entre outros equipamentos. Dentro deste sistema, podemos integrar o empilhamento robotizado de tijolos, levado a cabo pelos arquitetos, anteriormente mencionados, Fabio Gramazio e Matthias Kohler na ETH Zurich, é uma das inovações com mais sucesso na montagem automática e utilizando o sistema R-O-B, também desenvolvido pelos arquitetos acima referidos (figura 4.23). Considerado, ainda, por alguns, um processo aditivo, para este empilhamento é usado o poder de processamento dos robôs industriais para a criação de formas complexas e padrões de fachada.

Este processo, por entendimento do autor, não foi muito aprofundado neste capítulo, visto que no próximo o tema estará novamente presente e de forma mais explícita. Onde serão analisados casos de estudo de obras e instalações que utilizam este processo, de forma a introduzir na Arquitetura processos em desuso, como tende a acontecer à alvenaria em tijolo.



*Figura 4.23 - Intrincada linha de montagem automóvel, por meios de braços robotizados.*



*Figura 4.24- Uso desta tecnologia no âmbito da Arquitetura, empilhamento de tijolos.*



## 4.4. CONSIDERAÇÕES

As tecnologias anteriormente descritas proporcionam, atualmente, uma bagagem de novas ideias e soluções aos arquitetos. São passíveis de serem conseguidos resultados inovadores, de forma intuitiva e acessível, através dos meios de desenho computacional CAD/CAM. No entanto, tais efeitos não seriam possíveis se não estivessem disponíveis tecnologias tão avançadas como o braço robótico e os engenhos que podem ser acoplados. Estes processos, apesar de serem considerados tecnologia de ponta, nem sempre obrigam o artista a aplicar novos materiais, estes sistemas de criação e desenho permitem repensar o uso de antigos materiais em aplicações contemporâneas. Assim, da mesma forma, o autor sentiu-se motivado a (re)pensar o uso do tijolo mediante este novo paradigma tecnológico. Em suma, o uso destas tecnologias está cada vez mais expandido na Arquitetura e o processo de fabricação motiva, cada vez mais, a procura de uma Arquitetura tecnologicamente contemporânea.



## **5. ALVENARIA DIGITAL\_**

## 5.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o processo construtivo passa por uma negociação entre a pré-fabricação e a construção no local da obra. Os edifícios consistem numa montagem em grande escala, conseguida graças a um árduo trabalho manual, assistido por diversas ferramentas e maquinarias. Dentro deste processo analógico que tem sido usado, cada vez existe mais espaço de oportunidade para desenvolvimentos e avanços no âmbito construtivo.

Para tal, os processos de fabricação digital têm sido aplicados de forma direta, substituindo os métodos antigos por novos e de forma indireta, expandindo os conhecimentos e apetrechando os métodos usados com novas ferramentas. Neste contexto, o autor entende que o uso indireto destas tecnologias, pode favorecer muito mais os processos construtivos e de forma mais evolutiva, comparativamente à total substituição dos métodos antigos. Esta mútua ajuda entre Homem e máquina, é particularmente relevante em edifícios que possuem geometrias complexas, difícil de visualizar e posicionar no espaço real. A dificuldade aumenta, quando a construção possui componentes não *standard*, o que implica um posicionamento específico e preciso de cada um. Como explica Kolarevic (2003), depois dos componentes serem produzidos através de fabricação digital, a sua montagem pode ser aperfeiçoada com o uso de tecnologia digital. Contudo, o processo de montagem

a grande escala apesar de ser auxiliado pelas tecnologias, continua a ser um processo feito manualmente desde o início até à conclusão. Agora, tomando como referência o exemplo de Gramazio e Kholer, que com a ajuda de uma unidade robotizada, abriram ao mundo uma nova forma de encarar a Arquitetura. Como tal, a montagem robotizada não é apenas, um benefício para a produtividade e automatização, mas é também, a força que os arquitetos têm para continuarem a procura por uma Arquitetura tecnológica. Com cenário, serão abordados os casos de estudo de maior relevância, dos arquitetos acima referidos, bem como o projeto de investigação levado a cabo pelo autor, de forma a experienciar, na prática, a potencialidade das tecnologias de fabricação digital.



## **5.2. CASO DE ESTUDO: PHILIPPE BLOCK**

A procura de inspiração, no passado, foi tema que foi explorado por vários arquitetos na 13ª Bienal de Arquitetura de Veneza de 2012. Philippe Block, na sua última conferência em Sydney, explicou a importância do Arquiteto se debruçar sobre o passado com o intuito de reinventar o futuro. Exclamou ainda que, mais do que uma ferramenta para a obtenção de formas agradáveis à visão ou para a criação de imagens surpreendentes, o desenho paramétrico é uma mais-valia para a Arquitetura e para o seu desenvolvimento. Existe assim um futuro promissor para este tipo de desenho computacional, considerando a sua aplicação para produções cada vez mais fortes, ao mesmo tempo mais ligeiras e ainda para a produção de componentes de construção com menos material, dinheiro e tempo.

O trabalho de Philippe Block, líder do grupo de investigação BLOCK e parceiro de pesquisa estrutural no escritório *Ochsendorf, Dejong & Block*, tenta apropriar-se do passado e incorporá-lo novamente no presente, por meios paramétricos. Block utiliza as tecnologias modernas mais avançadas, como o desenho computacional e a fabricação digital, para reexplorar a história das técnicas construtivas. Referenciando métodos de construção antigos, tenta alcançar uma melhor economia e otimização do material.



*Figura 5.1 - Arquiteto e Engenheiro estrutural, Philippe Block. Alguns dos resultados obtidos pela sua equipa, no BLOCK Research Group.*

## 5.2.1. ABÓBADAS DE DUPLA CURVATURA.

Philippe Block, começou por encarar o passado para repensar a arquitetura, enquanto exercia como assistente de *John Ochsendorf*. Durante esse período, debruçou-se sobre tecnologias perdidas, como abóbadas góticas e também as abóbadas de Guastavino, como foi previamente descrito. Block (2007), explica “*As abóbadas são simples – ou não – depende da sua compreensão, é decerto um conceito que se aplica a qualquer escala, por isso é possível testar em pequenos modelos e antecipar o que acontecerá a uma escala real.*” Com este mote de trabalho foram desenvolvidos vários testes de construção em pequena escala, através de construção de modelos produzidos em peças individuais e montadas sem a necessidade de cola (figura 5.2). Da mesma forma que foram construídas as abóbadas de Guastavino, foi também alcançado pela equipa de Block (figura 5.3). No entanto, em vez de moldes em madeira e de curvaturas simples e repetidas, neste caso foi desenvolvido um *software* de procura automática do equilíbrio de uma forma, apelidado de RhinoVault. A partir do modelo equilibrado é gerado um tipo de suporte em cartão, cortado por métodos de fabricação digital (CNC) e montado no local devido, de forma a conformar a curvatura necessária para a construção da abóbada. Após a aplicação do método construtivo usado por Guastavino e curada a argamassa, são removidos todos os suportes. Com a ajuda dos processos digitais é, assim, possível reutilizar métodos ultrapassados, conferindo-lhes mais



Figura 5.2 - Criação e montagem de modelos a pequena escala, sem necessidade de colagem.



Figura 5.3- Modelo de uma abóbada de geometria livre, pelos métodos de Guastavino, mas utilizando um molde em cartão processado por CNC.

resistência, como, neste caso, ainda mais equilíbrio e sustentação apesar de utilizar menos material e tempo.

Philippe Block, como foi referido anteriormente, ambiciona o uso deste tipo de construção para habitações de baixo custo, em países subdesenvolvidos. Acredita que pode reduzir severamente os custos e os calendários de construção. Pelo fato de não ser abundantemente disponível, o tijolo industrial e os reforços em aço, este processo pode ainda fazer mais diferença uma vez que, o que não falta nos países anteriormente descritos é a terra, propícia à criação de blocos cerâmicos. Este conceito de utilização de terra para o fabrico de blocos, não é recente, todavia Philippe afirma que este método construtivo pode conseguir grandes feitos com muito pouco material, em alguns casos é possível a construção de um piso superior com cerca de 2 cm de espessura e sem reforço de aço.

Contudo, este sistema não é infalível e normalmente os países, que mais necessitam de casas de emergência e de baixo custo, são muito suscetíveis a terremotos. Uma condição mal colmatada por este tipo de construção, principalmente quando é concebida sem reforços.

Para além da aplicação residencial, a equipa de Philippe Block tem, nos últimos anos, desenvolvido um projeto de cobertura para grandes espaços exteriores em blocos de pedra trabalhada por meios de fabricação digital (CNC), para o Texas, nos Estados Unidos da América. A estrutura, não só não possuirá reforços de metal como também não necessitará de argamassa para a sua sustentação. A construção possuirá ainda um óculo para entrada de luz zenital.

### 5.3. CASO DE ESTUDO: GRAMAZIO E KOHLER

Anteriormente, foram analisados casos de estudo do uso do tijolo por métodos tradicionais, com o intuito de melhor perceber o que motivou os autores a optar por aquele método construtivo. Assim, como é necessário um entendimento do passado, é também indispensável perceber o que é feito na atualidade.

Com este mesmo mote, os arquitetos suíços Fabio Gramazio e Matthias Kohler (figura 5.4 e 5.5) tomam um novo desafio formal, enquanto tentam manter uma lógica de construção clara. Esta abordagem permite aos arquitetos focarem-se nas possibilidades de um único material, módulo ou forma. Através do uso de processos de desenho computacional e de processos de fabricação digital, tais como aqueles que foram estudados anteriormente. São desta forma conseguidas, repetições e orientações variáveis, de forma a obter resultados não esperados *a priori*. Estes processos exploram o rigor extremo e a velocidade das ferramentas digitais, como meio de ultrapassar o que de outra forma seria um desgaste de tempo e de mão-de-obra durante o processo construtivo. Para tal, seguidamente, será abordada a obra Gantenbein winery, onde o autor entende que a sua importância remete, para o fato dos processos de fabricação digital serem utilizados para obter geometrias e texturas dentro de um plano.

Na instalação “*Structural Oscillations*”, poderemos encontrar o tema da fabricação digital muito mais desenvolvido, onde o intuito é explorar a capacidade do



Figura 5.4 - Fabio Gramazio.



Figura 5.5 - Matthias Kohler.



sistema em lidar com geometrias de dupla curvatura e o seu equilíbrio estrutural. Ainda será explorada uma outra perspectiva deste tema, as colunas programadas, neste caso será averiguado um novo elemento para além da parede e o seu possível uso como elemento estrutural. Todas as obras atrás referidas pertencem aos arquitetos Gramazio e Kohler.



*Figura 5.6 - Exterior da instalação "Structural Oscillations", no pavilhão Suíço.*

### 5.3.1. GANTENBEIN WINERY

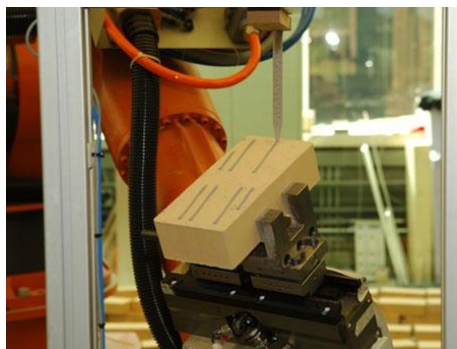
No panorama de uma Arquitetura tecnológica, foi em 2006, apresentado aos arquitetos Gramazio e Kohler um projeto peculiar, a construção de uma adega em Gantenbein, na Suíça. Ao mesmo tempo, ambos, estavam envolvidas num projeto de investigação intitulado de R-O-B, tentaram aliar as inovações e conhecimentos adquiridos, às necessidades básicas de um edifício como este. Esta construção tinha como premissas a luz indireta e uma grande permeabilidade ao ar. Com estas ideias e de forma a ligar o edifício ao tema chave da adega, optaram por uma imagem de um conjunto de uvas. Através de meios de desenho computacional elaboraram, uma definição, que permitisse relacionar o contraste da imagem pretendida, com a rotação necessária dos tijolos. Desta maneira, obtendo um jogo de formas e sombras que à luz do dia configura a imagem do conjunto de uvas na fachada (figura 5.6). Todavia, este processo requeria uma precisão imensa, para que o resultado fosse minimamente satisfatório. Para tal, a investigação dos arquitetos foi indispensável, uma vez que, com a ajuda do braço robótico, a montagem dos tijolos foi possível de forma automatizada. Todo este processo resultou numa fachada de 400 m<sup>2</sup> com mais de 20.000 tijolos (figura 5.7), cada um com uma rotação específica e colocados de forma precisa. Como anteriormente referido, essa disposição foi indispensável para proporcionar a requerida sombra, que desenha a imagem final. Contudo, este processo não foi concluído todo de uma só vez. Devido ao volumoso edifício e à distância



*Figura 5.6 - Vista exterior da adega de Gantenbein.*



*Figura 5.7 - Vista interior da adega de Gantenbein, barris recebem luz indireta e ar fresco.*



*Figura 5.8 - Aplicação automatizada da argamassa de fixação dos tijolos.*

entre o local de fabricação dos painéis e a obra. Com este entrave, os arquitetos, decidiram dividir a fachada em 72 painéis diferentes uns dos outros, de forma a facilitarem o transporte e a entrega, bem como o processo de fabricação. Visto que a montagem foi executada por um braço robótico, o raio de ação do mesmo era limitado, logo a sua divisão em distâncias mais curtas era inevitável.

Devido à falta de desenvolvimento do sistema, visto ser umas das primeiras tentativas de montagem, foi necessário otimizar o processo de colocação de argamassa. A resolução deste dilema consistiu na criação de um sistema automatizado de depósito de argamassa (figura 5.8), por meio de uma bisnaga. Com isto foi possível também, racionar a quantidade usada e aplicar somente a porção necessária para a sustentação. A cada painel, ainda que resistentes após a conclusão do processo, por opção dos arquitetos, foi adicionado um lintel pré-fabricado de betão. Este elemento além de proporcionar mais rigidez aos painéis, tanto na montagem como no transporte, tinha, também, o intuito de manter um ritmo na fachada. Resultando num simbolismo de uma grelha, à imagem de um cesto que suporta as uvas no seu interior.

Neste sistema, foram utilizados os processos de desenho computacional e de fabricação digital, para chegar a um resultado formal. Contudo, este resultado baseou-se simplesmente no nível do plano, não entrando diretamente em formas complexas de dupla curvatura. Somente mais tarde foi explorada outra tentativa de construção em alvenaria por meios de robotizados, como veremos de seguida.

## 5.3.2. STRUCTURAL OSCILLATIONS

Em 2008, decorridos dois anos da construção da adega, o desenvolvimento do sistema R-O-B tinha avançado em grande escala, assim como o poder computacional. Com o objetivo de mostrar as capacidades deste novo processo de fabricação os arquitetos Gramazio e Kohler, entenderam que era do interesse geral, partilhar com a comunidade científica as suas inovações. Para tal, a contribuição dos arquitetos suíços, para a exposição “*Explorations*”, na 11ª Bienal de Arquitetura de Veneza de 2008, foi uma instalação de uma parede de tijolo.

O projeto consistiu numa parede de cerca de 100 metros de comprimento, desenhada como uma fita contínua, dentro do pavilhão suíço (figura 5.10). O desenho da parede foi desenvolvido através do mesmo método computacional algorítmico, usado anteriormente na adega de Gantenbein. A construção, em oposição à da adega, foi conseguida no local da obra e por meios do braço robótico (figura 5.11 e 5.12). As suas curvas e contracurvas definem um espaço central e outros intersticiais, entre a parede de tijolo e as paredes do pavilhão. Gramazio e Kohler (2008), explicam que através da sua materialidade e configuração espacial, a parede é constituída por 14.961 tijolos, todos eles com um ângulo de rotação destinto. Ao mesmo tempo, entra em diálogo direto com a estrutura moderna, de 1951 do Arquiteto Bruno Giacometti.



Figura 5.10 - “Structural oscillations”, instalação apresentada na 11ª Bienal de Arquitetura de Veneza.



Figura 5.11 - Estrutura automatizada de construção, R-O-B.

A definição desenvolvida para a conceção, consistia no desenvolvimento de uma simples curva, onde eram depositados todos os parâmetros necessários para formalizar o modelo. A curva funcionava como um método de gerar automaticamente as curvaturas. No entanto, não só pelo fato do processo de construção ter que ser executado em dimensões mais curtas, mas também devido a ser necessário uma estabilidade mais assegurada, a definição foi configurada para calcular apenas 4 metros de parede de cada vez. Ainda que para garantir um maior equilíbrio, cada curva na base era contrabalançada por uma contracurva no topo. Resultando assim, na imagem intrincada e ondulada que dá expressão a esta instalação. Aliado a estas curvas, foi adicionada mais uma condicionante. Esta que, de acordo com a curvatura da parede, cada tijolo é rodado, ou seja, quanto maior o arqueamento da curva onde a parede está inscrita, maior é o ângulo de rotação dos tijolos.

Nesta obra, o autor entende que é de salientar o uso da dupla curvatura para a conformidade da parede, assim como a necessidade dos arquitetos em aplicar as novas tecnologias em materiais *standard* e de uso originalmente manual.

Tomando agora, como exemplo as paredes da igreja do Cristo Obreiro de Eládio Dieste e contrapondo para esta obra, é notório como esta tecnologia poderia facilitar e flexibilizar conceções semelhantes. Conseguindo, com isto, revolucionar o uso do tijolo, restituindo o seu protagonismo face a outros materiais modernos.



Figura 5.12 - Braço robótico, KUKA KR150 L110.



### 5.3.3. PROGRAMMED COLUMNS

Uma outra vertente das capacidades da tecnologia desenvolvida pelos arquitetos Gramazio e Kohler, tem em conta um sistema estrutural vertical, a coluna.

Como vimos anteriormente, o caso da adega, de Gantenbein consiste em usar estes processos para flexibilizar o tijolo num plano. Na instalação *Structural Oscillations*, o objetivo foi desenvolver o sistema para atingir duplas curvaturas. Todavia, a procura do desenvolvimento, fez com que os arquitetos se debatessem com problemas de sustentação e estruturais.

Numa primeira fase, foram procuradas formas geométricas que se assemelhassem, tanto na aparência como na capacidade estrutural, com colunas de suporte. Foram então conseguidos vários testes, aquando de um curso na ETH de Zurique, em 2009. Nessa altura o material facultado aos estudantes foi a madeira. As premissas para a construção, eram o equilíbrio antes, durante e depois do fabrico, sem qualquer suporte (figura 5.13).

No ano seguinte e devido ao sucesso do curso anterior, foi executada a segunda edição de “*Programmed Columns*”. Nessa edição, os alunos foram desafiados, a durante 4 semanas de trabalho, construir 3 protótipos de colunas com 4 metros de altura (figura 5.14). Simultaneamente, foi utilizado um programa de análise estrutural, dado que uma das condicionantes era a sua capacidade de carga.



Figura 5.13 - Exemplo de protótipo de coluna, da primeira edição do curso "Programmed Columns", em 2009.



Figura 5.14 - Protótipos que resultaram da segunda edição do curso "Programmed Columns", em 2010.



*Figura 5.14 - Construção robotizada das colunas.*



*Figura 5.15 - Interior do West Fest Pavilion.*

*Figura 5.16 - Vista exterior do West Fest Pavillion.*



Uma outra aplicação deste sistema, a nível estrutural, foi apresentada em 2009, em Wettswil am Albis, na Suíça. Como uma espécie de pavilhão, esta estrutura temporária, consistia em 16 colunas, que foram construídas a partir de 372 ripas de madeira (figura 5.14 e 5.15). Toda a construção faz parte da estrutura, da cobertura e da própria fachada do edifício. Para tal, os elementos foram montados, pelo braço robótico, que tinha a função de cortar e colocar precisamente cada porção das ripas de madeira. Foram instalados segundo um padrão algorítmico, de forma a obter um curvatura subtil de peça para peça. Durante todo o processo, a lógica de construção e o aspeto estético, tiveram em conta as regras de construção em madeira.

## **5.4. CASO DE ESTUDO: PROJETO DE INVESTIGAÇÃO IJUP**

Com a colaboração interdisciplinar entre uma equipa de Centro de Estudos em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto (CEAU/FAUP), onde o autor está integrado, e uma equipa do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O projeto de Investigação Jovem da Universidade do Porto (IJUP), o qual o autor tomou como base para a elaboração desta dissertação, visa explorar a tecnologia de fabrico digital mais avançada e flexível disponível atualmente – o braço robótico – com o intuito de investigar o seu potencial de inovação formal e construtivo em Arquitetura.

Com este objetivo, a equipa de investigação debruçou-se sobre o tema de construção em alvenaria a partir da justaposição de elementos regulares, como o tijolo. Pois sendo um material de dimensões padronizadas e de aplicação manual em obra, este método construtivo está tradicionalmente condicionado à realização de formas simples e maioritariamente planas.





## 5.4.1. MÉTODOS E TÉCNICAS

Após um conhecimento, mais aprofundado do tema de desenho computacional, o autor entende que o desenho paramétrico está cada vez mais presente na forma de projetar do Arquiteto, a possibilidade de fazer alterações em cadeia, de explorar soluções não conhecidas à partida e principalmente a eventualidade de lidar com formas complexas de forma mais imediata, torna este método uma ferramenta indispensável no dia-a-dia do Arquiteto.

Dentro de um leque de ferramentas paramétricas, o autor, aquando do projeto de investigação IJUP, utilizou em conjunto com o *software* Rhinoceros 3D (figura 5.17 e 5.18), o *plug-in* Grasshopper (figura 5.19).

Esta aplicação é uma interface visual de programação desenvolvida por David Rutten com Robert McNeel & Associates (criadores do *software* Rhinoceros), relatado por Tedeschi (2011) em uma entrevista a David Rutten. O *Grasshopper* é executado em simultâneo com o programa de CAD *Rhinoceros 3D*, onde as alterações do modelo são exibidas em tempo real na janela do programa. Foi criado para uma utilização intuitiva, que ao contrário de uma escrita em *script* direta, são colocados componentes numa base de trabalho (figura 5.20). Os elementos são compostos de entradas e saídas que são posteriormente, conectados com as entradas ou saídas dos componentes subsequentes. Maioritariamente, este tipo de aplicação é usado para construir algoritmos generativos, mas também alguns dos elementos



**Rhinoceros**  
NURBS modeling for Windows

Figura 5.17 - Logótipo Rhinoceros 3D

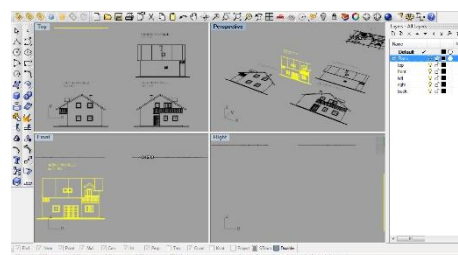


Figura 5.18 - Ambiente de trabalho do *software* Rhinoceros 3D, numa plataforma Windows.



Figura 5.19 - Logótipo do *plug-in* Grasshopper.

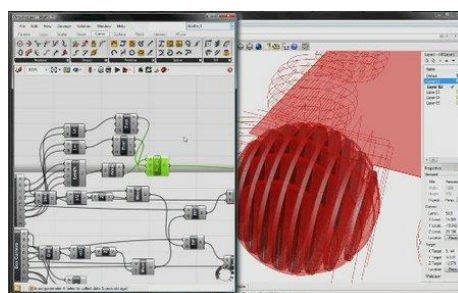


Figura 5.20 - Base de trabalho onde são colocados e conectados os componentes do Grasshopper.



conectores são utilizados para criar geometrias tridimensionais. Suporta ainda outros tipos de algoritmos dos quais numéricos, textuais, audiovisuais, recolha de dados e ligação com interfaces exteriores como sensores e placas de Arduino (figura 5.21).

Tendo em conta os diversos processos de fabricação digital, o braço robótico industrial possui muitas vantagens de que pode beneficiar a construção *in situ*. A produção de componentes com geometrias não estandardizadas, no próprio local, seria apenas possível com este tipo de maquinaria. Uma vez que, ao contrário do processamento CNC, os braços robóticos possuem uma forma mais inteligente de processar os dados e de implementar várias tarefas em sequência. Isto possibilita a simplificação da fabricação e o processo de montagem,



Figura 5.21 - Ligação de uma placa de Arduino, placas de desenvolvimento para controlo de motores de passo, sensores, etc...



Figura 5.22 - Braço robótico industrial, ABB IRB 140.

fazendo uso da hipótese de acoplagem de pequenas engenhos ao braço. Resolvido o problema da mobilidade, exemplo do R-O-B, o braço robótico que permite ao arquiteto movê-lo para o local da construção e até deslocá-lo dentro da obra. Com isto, o preço das peças produzidas em fábricas, o transporte e até o custo associado à utilização das máquinas pode ser drasticamente reduzido. No projeto de investigação IJUP e com o auxílio do pessoal docente da FEUP, foi possível, ao autor e ao grupo de trabalho, o uso do braço robótico para experimentação das tecnologias anteriormente apresentadas. Apesar de modesto em termos de tamanho, o robô IRB 140 (figura 5.22) de 6 eixos, é bastante poderoso, capaz de carregar cargas até 6kg e alcançar um raio máximo de 810mm (sobre 5 eixos). Neste estudo, a sua posição é estática e horizontal, porém é passível de ser montado no teto, numa parede ou até sobre carris.

## 5.4.2. EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS

O próximo passo no desenvolvimento seria chegar a um conjunto de soluções plausíveis de serem construídas. Para isso, o autor, após conhecimento das ferramentas acima referidas, em conjunto com o grupo de investigação do projeto IJUP, desenvolveu uma definição paramétrica (figura 5.23). Apresentando em *appendix* uma imagem mais detalhada para a construção tridimensional da parede de tijolos.

A definição consiste em vários parâmetros que afetam direta e indiretamente a composição da parede. Numa primeira parte estão presentes as variáveis de influência: Dimensões atribuídas ao tijolo; Composição da superfície da parede; Número de fiadas de tijolo; Número de tijolos por fiada; Rotação dos tijolos em função de um ponto ou de uma curva.

Uma vez que as dimensões do IRB 140 são reduzidas, optou-se por escolher blocos de cortiça de dimensões proporcionalmente aproximadas ao tijolo cerâmico, cerca de 120x60x30mm (figura 5.24). O uso da cortiça no projeto de investigação, não teve apenas em conta as dimensões ou o peso de cada bloco, mas também a consciência de optar por um material nacional e que cada vez mais se encontra em voga na arquitetura contemporânea portuguesa e internacional. Na conjectura de soluções, um dos principais objetivos foi a procura de geometrias

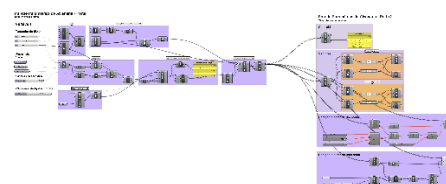


Figura 5.23 - Definição paramétrica desenvolvida para modelar paredes de tijolo com formas geométricas complexas.



Figura 5.24 - Bloco de cortiça de dimensões 120x60x30mm, fabricado a partir de processos de CNC.

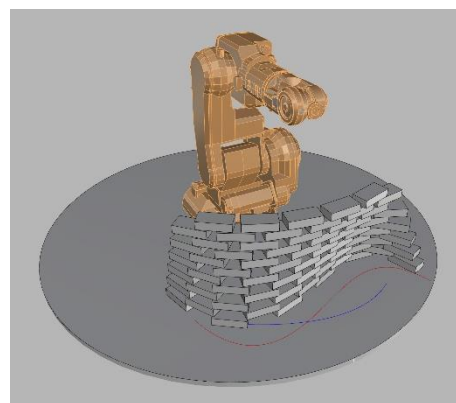


Figura 5.25 - Modelo tridimensional da construção da parede. Curva de influência da base a vermelho. Curva de influência de topo a azul.

livres e de difícil construção por meios tradicionais, para assim mostrar a habilidade e capacidade desta tecnologia em lidar com formas mais complexas. Para isso, a definição paramétrica foi desenvolvida para que a superfície em que a parede está inscrita seja criada a partir de três curvas (figura 5.25). Uma curva na base, dita o desenho da primeira fiada e por sua vez os pontos de sustentação da parede. A curva do meio delimita a variação da geometria, enquanto, a curva de topo influencia o fecho da parede. Todas as curvas podem ser editadas para conseguir outros tipos de geometrias.

A parede não é apenas caracterizada pela sua geometria, mais ou menos regular, é também importante de referir que o comprimento e a altura podem ser alterados. Aumentando ou diminuindo o número de tijolos em cada fiada, é conseguida uma maior ou menor distância de topo a topo, enquanto que, modificando o número de fiadas outras medidas são passíveis de alcançar em relação à altura da parede.

Estando definidas as dimensões da parede, assim como a sua geometria é de salientar que uma das mais-valias desta técnica é a possibilidade de colocar cada bloco com elevado rigor. Assim sendo, a rotação dos tijolos para conseguir padrões distintos era indispensável. Para tal, foram desenvolvidas duas formas de influência: Por um lado, uma que mediante a distância de cada bloco a um ponto específico altera a rotação em função do seu centro. Por outro lado, outra que em função de uma curva, com qualquer geometria, modifica a rotação dos tijolos em relação a um número de pontos em que a curva é dividida. No entanto, de forma a simplificar o modelo

para o teste de montagem, a curva central foi anulada e a rotação dos tijolos manteve-se apenas influenciada pela curvatura da superfície onde a parede está inscrita.

Passada a fase de produção de soluções tridimensionais digitais, colocou-se a necessidade de encontrar um meio de comunicar o modelo ao braço robótico. Para tal, seria necessário a recolha dos valores “*Centroid*” e dos vetores inscritos em cada bloco.

Na matemática e na física, o termo “*Centroid*” ou centro geométrico é o ponto onde qualquer plano se encontraria em pleno equilíbrio. Tomando como exemplo uma placa de cartão que se poderia equilibrar na ponta de uma agulha (tendo em conta uma densidade e um campo gravitacional uniforme). Neste caso, a escolha do centro geométrico de cada bloco não é maioritariamente pelo seu equilíbrio, mas sim de forma a facilitar o robô a efetuar a rotação dos tijolos uniformemente. Aplicando o eixo de rotação sempre no centro de cada bloco.

A utilização das ferramentas, acima referidas, em conjunto com os recursos disponíveis na FEUP, resultou num teste automatizado de construção de uma parede de tijolos de cortiça. Para tal, o autor, em colaboração com o grupo de investigação, desenvolveu um conjunto de soluções passíveis de serem testadas. As soluções tiveram em conta o raio máximo de alcance do robô e foram geradas a partir da definição paramétrica, acima mencionada. As geometrias criadas foram escolhidas pela complexidade, mas também pelo seu equilíbrio. Controlando o ângulo máximo de curvatura na vertical tornou-se possível manter uma parede inclinada em equilíbrio (figura 5.26 a 5.29).

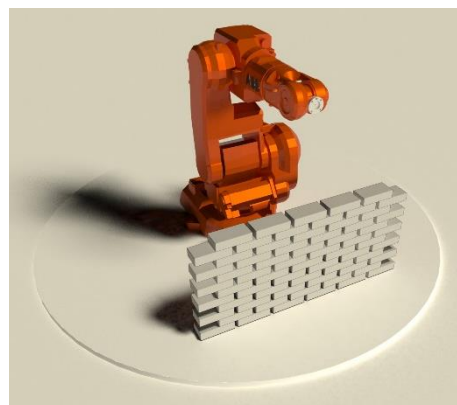


Figura 5.26 - Parede controlo, de geometria plana.

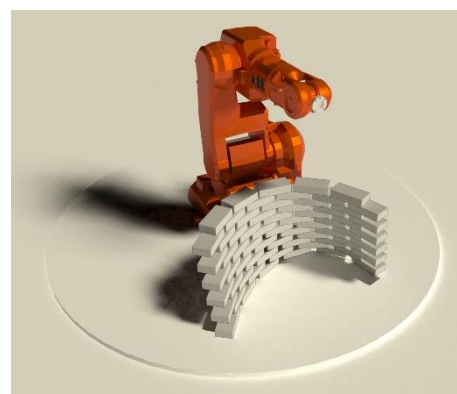


Figura 5.27 - Parede de dupla curvatura teste 1.

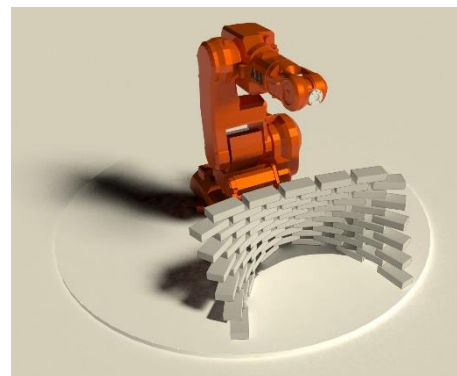


Figura 5.28 - Parede de dupla curvatura teste 2.

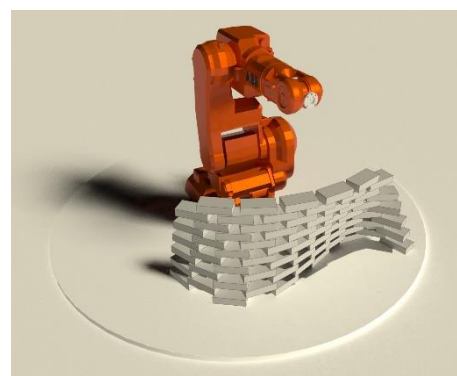


Figura 5.29 - Parede de dupla curvatura teste 3.



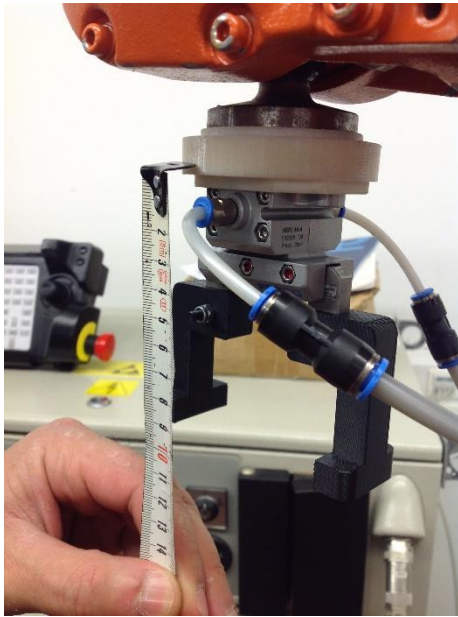


Figura 5.30 - Garra desenvolvida pelo pessoal da FEUP.



Figura 5.31 - Aplicação da cola quente, enquanto o robô faz a montagem da parede.



Figura 5.32 - Resultado final da parede de cortiça, construída através de fabricação digital.

Um outro dilema, desde logo resolvido pelo pessoal da FEUP, foi o *layout* de descarga dos tijolos. A acomodação dos tijolos foi desenvolvida de forma eficiente para um robô de uso estacionário (figura 5.32). Consistia em uma grelha de descarga por gravidade, onde era possível ao robô a recolha dos blocos sempre no mesmo ponto, não acrescentando mais informação do caminho a ser processado.

Após estarem resolvidos os pormenores necessários para a realização do teste, tais como erros de *delay* da garra e ajustes de velocidade do robô, finalmente os dados são processados de forma otimizada e é começado o teste de empilhamento.

Ainda assim, aquando da elaboração desta dissertação, apenas foi possível um único teste, ao qual foi necessário uma geometria mais simples, de forma a minimizar o tempo de teste bem como, as variáveis que o poderiam fazer parar e recomeçar. Para tal, foi escolhido a parede de dupla curvatura teste 1 (figura 5.27). Para a fixação dos tijolos foram testados dois métodos, a fita-cola de dupla face e a bisnaga de cola quente. Nos resultados abaixo apresentados foi utilizada a fita-cola de dupla face, uma vez que, demonstrou ser um método mais simples e com uma espessura de junta constante.





Figura 5.33 - Layout de recolha dos blocos pelo braço robótico.

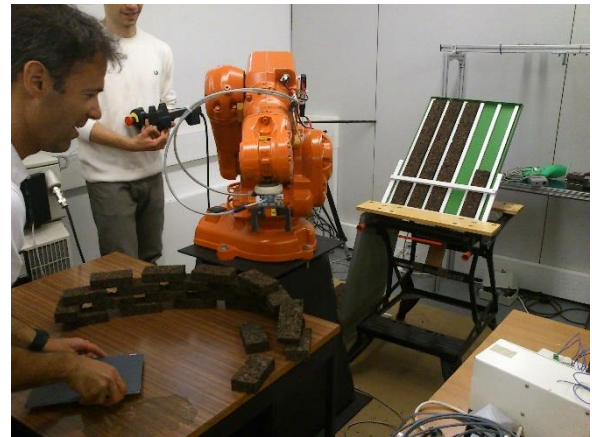


Figura 5.34 - Primeiras fiadas de blocos e ajustes no código.



Figura 5.35 - Parede parcialmente concluída, recolha de imagens.



Figura 5.36 - Vista exterior da curvatura da parede.

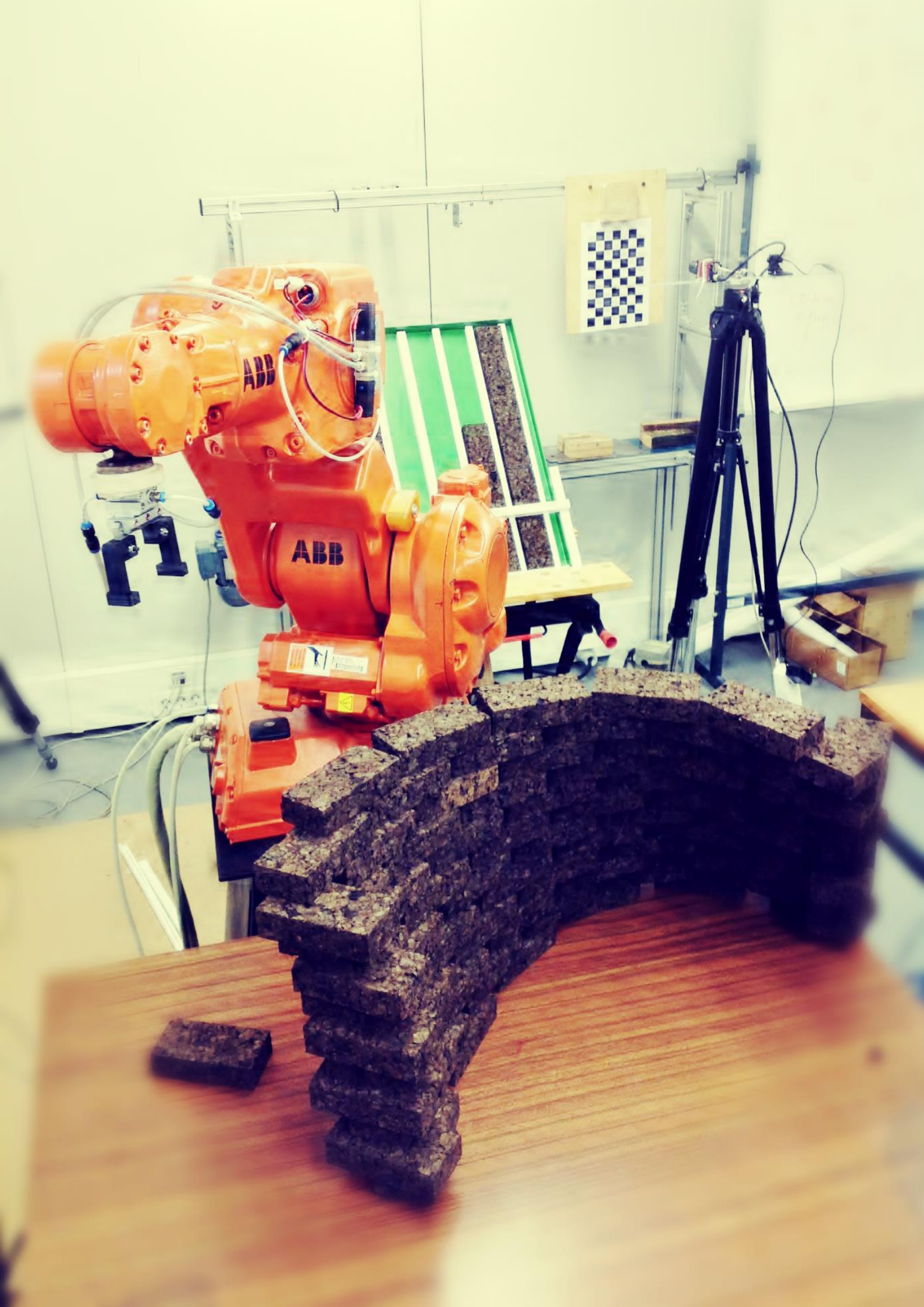


Figura 5.37 - Vista interior da curvatura da parede.

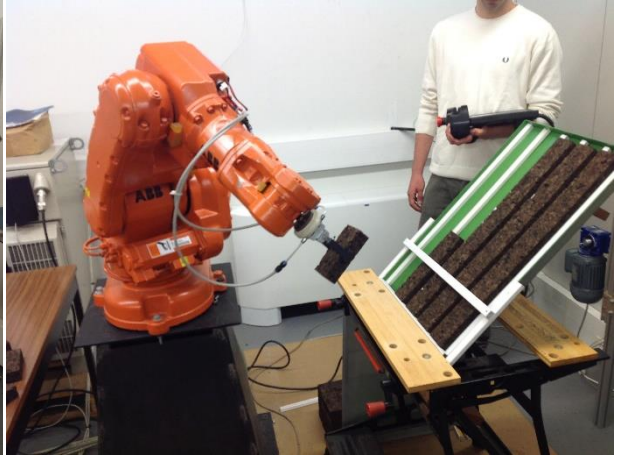
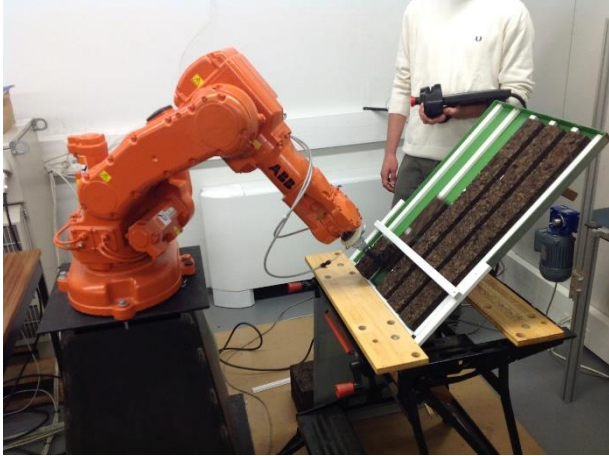


Figura 5.38 e 5.39 - Modelo no exterior e virado ao inverso da sua produção.

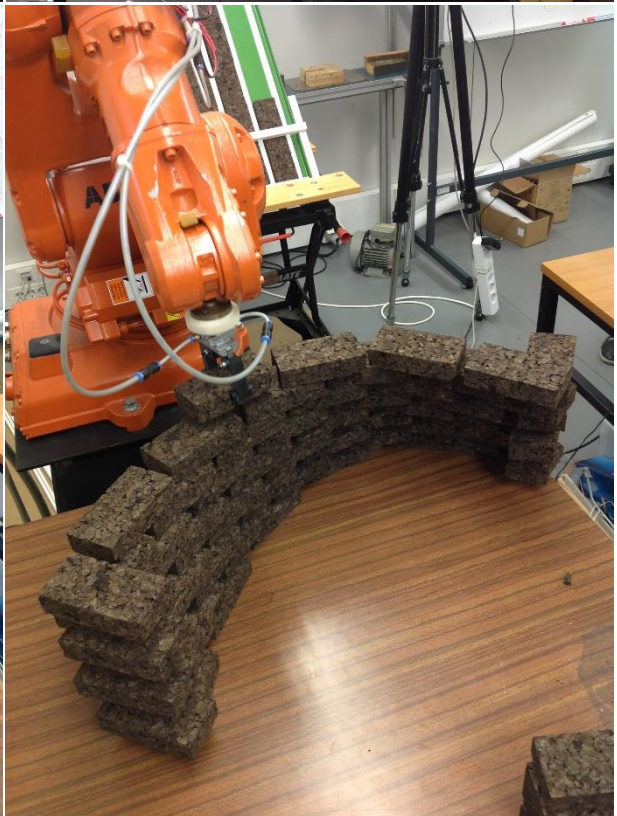
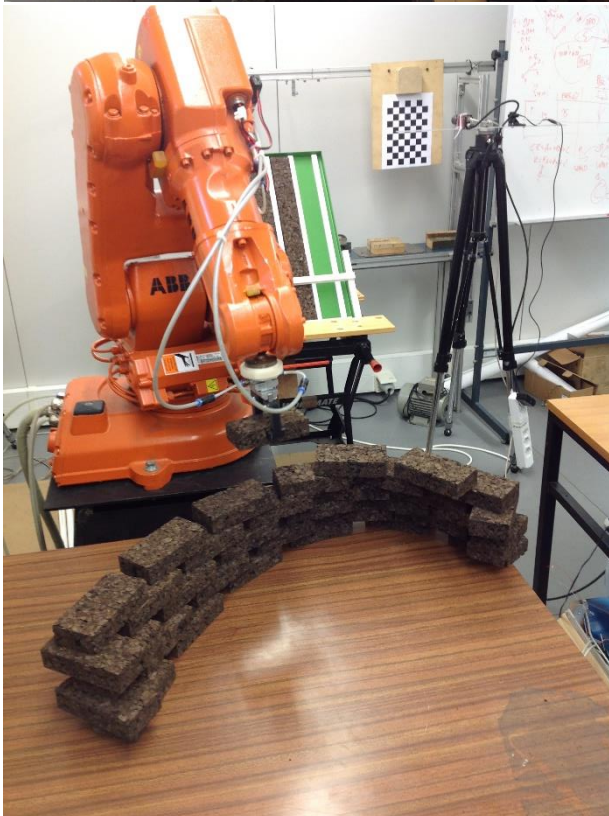
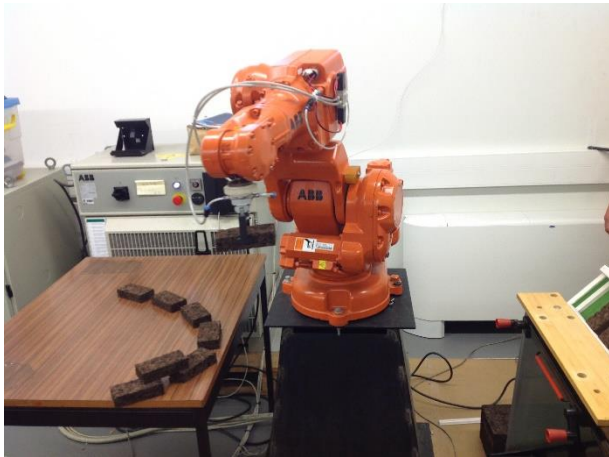
















## **6. CONCLUSÃO\_**

## 6. CONCLUSÃO

Durante o processo de desenvolvimento da presente dissertação, foram utilizados outros processos de fabricação e de simulação. Através do uso de uma fresa CNC foram cortados os tijolos de cortiça, necessários às simulações de montagem manual da parede, mas também, mais tarde, para o teste automatizado. O processo automatizado de construção de uma parede de tijolo foi o tema investigado pelo autor, que resultou no desenvolvimento de uma definição paramétrica, capaz de gerar o modelo e as coordenadas necessárias para a montagem robótica. Sendo que, o desenho, a fabricação e a montagem podem ser controlados automaticamente por meios parametrizados e robóticos, qualquer mudança no processo pode ser facilmente executada. Com isto, os arquitetos podem enviar os dados alterados diretamente para o robô e a interface entre o desenhador e o construtor poderá ser reduzida drasticamente.

Uma vez que, não foi possível uma recolha estimada do tempo necessário para a construção da parede de geometria similar à conseguida no teste de montagem, utilizando processos tradicionais, o autor utilizou uma tabela produzida por Yuchen LIU (2009) (figura 6.1), para demonstrar a diferença de tempo entre os métodos de construção tradicionais e os processos de fabricação digital.

*Figura 6.1 - Tabela demonstrativa do tempo necessário para uma construção em tijolo tradicional (CM) e o tempo necessário para a produção da mesma parede por métodos de Fabricação Digital (SBP) – montagem com tijolo standard e (CBP) – montagem com tijolo customizado.*

	CM	SBP	CBP
Design Concept	15 min	15 min	15 min
Parametric Modeling	60 min	60 min	60 min
Shop Drawing	150 min	N/A	N/A
Fabrication-Prep	38 min	68 min	70 min
Machining	45 min	40 min	42 min
Assembly	240 min	6 min	5 min
<b>Total</b>	<b>548 min</b>	<b>195 min</b>	<b>197 min</b>

É de salientar que, na construção de uma parede de tijolo através de métodos tradicionais, existe uma diferença de 353min, cerca de 6 horas a mais, em comparação com uma parede semelhante produzida por Fabricação Digital. Nesta tabela, Yuchen Liu apresenta ainda o tempo necessário para uma assemblagem de tijolos customizados, que resulta em tempo acrescido na fabricação dos blocos. No entanto, apesar de a mesma não ter sido mencionado nesta dissertação, a customização dos blocos pode levar a resultados de paredes contínuas, sem espaços entre os tijolos, mantendo ainda assim a dupla curvatura da superfície em que está inscrita.

Um dos principais pontos forte do processo investigado pelo autor é dar ao Arquiteto um novo método de desenho não pré-determinado. Incorporando os conhecimentos do desenho computacional, da construção em tijolo tradicional e a construção automatizada, de forma a produzir de formas complexas de alvenaria. A definição paramétrica pode gerar o código e enviá-lo diretamente para o robô, o que faz com que os desenhos de construção sejam desnecessários, completando assim

uma sequência de automatização – Desenho; Fabricação; Construção.

No entanto, nem um processo parcialmente automatizado, onde o material é processado por máquinas e montado manualmente, nem mesmo o sistema investigado pelo autor, são o apogeu destes processos robotizados. Uma visão de uma tecnologia passível de recolher matéria-prima do local de construção, moldá-la e montá-la com a forma desejada, é possivelmente a maior procura da arquitetura tecnológica.

No entanto, certamente foi levantada uma questão, durante a leitura desta dissertação. O que farão os trabalhadores? Como será o futuro se não mais forem necessários para a economia?

A raiz do problema encontra-se no porquê de não necessitarmos mais de tantos trabalhadores. Porquê? Maioritariamente, devido ao fato dos empregos e os lucros não estarem inseparavelmente ligados. A Humanidade tem sido tradicionalmente a forma mais eficiente de produzir riqueza, mas com o aumento da automatização, este panorama está a começar a mudar. Segundo Paul Krugman (2013), quando o Ser Humano, não for mais necessário para o funcionamento da economia, podem acontecer dois tipos de situações. Uma apelidada de *Scarcity*, onde o problema económico estará instalado e as necessidades do ser humano continuarão ilimitadas, mas por conseguinte, os recursos serão limitados e não poderão ser atendidos todos os pedidos.

Por outro lado, Krugman (2013) aponta que num outro cenário, a tecnologia avançaria de tal forma que a

produção dos bens de consumo seria virtualmente de graça. Neste contexto, os trabalhos seriam removidos do sistema económico e a todas as pessoas seria fornecida uma quantidade igual de bens, de forma a viverem saudáveis. Ao mesmo tempo o Ser Humano poderia continuar a procurar o que o faz feliz e realizado.

Todavia, ainda estamos longe de um panorama idêntico, seja ele qual for. O cenário atual, ainda demanda bastante trabalho e com o desenvolvimento, cada vez mais acelerado, da tecnologia, é imposto ao Homem uma incessante procura de soluções para o dia-a-dia. Assim, ao Arquiteto, é também incutida a vontade de investigação de novas metodologias de desenho e soluções de construção. Como tal, o autor entende que, uma futura investigação, poderia debruçar-se sobre a inteligência artificial, onde o robô estaria apetrechado com sensores de leitura do terreno e reconhecimento automático de diferentes materiais.

Outro possível estudo, poderá passar por determinar *a priori* o equilíbrio do modelo a ser construído e qual a forma otimizada para tal efeito.

Por fim, e como durante esta dissertação esteve presente apenas um elemento da construção, a parede, uma outra pesquisa poderá ser guiada ao desenvolvimento de coberturas e estruturas de suporte. No entanto, para isso, as pesquisas futuras referidas anteriormente, necessitam de um pouco mais de elaboração.





## **BIBLIOGRAFIA\_**

## BIBLIOGRAFIA

### FONTES PRINCIPAIS

AFIFY, Hazem M. N.; ABD ELGHAFAR, Zeinab A. (2007) – **Advanced Digital Manufacturing Techniques (CAM) in Architecture Authors**. Egypt, Menoufia University.

ANDRADE, Francisco O. (1995) – **Teoria y Tecnicas de la Edificacion: Calculando el pasado, La bóveda del palacio de Ctesifonte**. Revista de Edificación nº20.

BIRGIT Bastiaan e HARTWIG Rullkötter (2005) – **Between Sculpture and Construction in: Frank Gehry: MARTa Herford**. Basel, Birkhäuser.

BRICK BIOTOPE (2003) – Fonte: (<http://conservationmagazine.org/2013/06/brick-biotope/>) 15 de Agosto de 2013

BURRY, M. (1997) – **Computer Aided Architectural Design Using Parametric Variation and Associative Geometry**, em: **Proceedings of the 15<sup>th</sup> eCAADe Conference**, Vienna University of Technology.

CHIRICO, Mercedes (2012) – **Disparos sobre la arquitectura 4: Eladio Dieste**. Uruguay, Facultad de Arquitectura Universidad de la República Montevideo.

Chronology of the cathedral of St. John The Divine. (2013) - Official Site of cathedral, New York 2012. Fonte: <http://www.stjohndivine.org/documents/CathedralHistory.pdf> Cons. 21 de Julho de 2013

CLAY BRICK ASSOCIATION, (South Africa) (2002) – **Clay Masonry Technical Guide**. South Africa, Clay Brick Association, ISBN 0-620-27655-X.

DEPLAZES, Andrea (2005) – **Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures**. Basel, Birkhäuser. Cop. 2005 ISBN-10: 7643-7189-7.

Encyclopedia of Triangle Centers (2013) – ETC. Fonte: <http://faculty.evansville.edu/ck6/encyclopedia/ETC.html> (cons. 14 de julho de 2013)

GEHRY, Frank O. (1999) – **Der Neue Zollhof Düsseldorf**. German, Pomp.

GRAMAZIO, Fabio; KOHLER, Matthias (1999) – **Digital Materiality in architecture**. Baden, Lars Müller. ISBN 978-3-03778-122-7.

GUASTAVINO, Rafael (1893) - **Essay on the Theory and History of Cohesive Construction**. Boston, Ticknor and Company.

KOLAREVIC, Branko (2000) – **Digital Architectures**, in Eternity, Infinity and Virtuality – Architecture Proceedings of the ACADIA 2000 Conference. Washington.

KOLAREVIC, Branko (2003) – **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**, Spon Press.

KROUSE J.K. (1982) – **What every engineer should know about computer-aided design and computer-aided manufacturing. The CAD/CAM revolution**. New York, N.Y.

KRUGMAN, P. (2013) – **What Happens When Robots Eliminate All Our Jobs?** Fonte: (<http://www.fastcolabs.com/3013063/what-happens-when-robots-eliminate-all-our-jobs>) 5 de setembro de 2013

LEE K. (1999) – **Principles of CAD/CAM/CAE systems**. Addison, Wesley

LIU, Yuchen (2009) – **Robotic Design Construction: Digital Fabrication Strategies for Freedom Masonry Casting and Mobile Assembly**. Massachusetts Institute of Technology.

LUNA, Manuel F.; BERNAL, Vicente L.(2003) – **Proceedings of the First International Congress on Construction History: The timber vault (Extremaduran vault)**. Madrid.

MROSZCZYK, Lisa J. (2004) – **Rafael Guastavino and the Boston Public Library**, Massachusetts Institute of Technology.

PFEITER, Günter (2001) – **Masonry construction manual**. Basel: Birkhäuser. ISBN 3-7643-6543-9.

PONCE DE LEON, M.; TEHRANI, N. (2002) - **Versioning: connubial reciprocities of surface and space**. Architectural design.

ROMÁN, Cláudio E. (2012) – **Dissertação de Mestrado: Eládio Dieste e a cerâmica armada. Brasília**.

SAVE WATER BRICK (2013) – Fonte: (<http://www.yankodesign.com/2009/11/02/not-another-brick-in-the-wall/>). 15 de Agosto de 2013

Sítio oficial da marca ABB robotics fonte:<http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-140> (cons. 10 de Julho 2013)

SOVINSKI, Rob W. (1999) – **Brick in the Landscape: A Practical Guide to Specification and Design**. New York, John Wiley & Sons, Inc.

TEDESCHI, Arturo (2011) – **MixExperience Tools I: “Entrevista a David Rutten”**. Naples, MixExperience.

VILLMAN, Juriy A. (1995) – **Automation and Robotics in Construction XII: Technological Aspects of Automation and Robotics in Construction**. Warsaw: IMBiGS. ISBN 83-86040-02-5.

ZEID, I. (1991) – **CAD/CAM Theory and Practice**. McGraw-Hill.

#### **FONTES COMPLEMENTARES**

BUDNY, E. (1996) – **Automation in Construction Vol. 5**. Warsaw, Elsevier Science.

DIESTE, Antonio (2004) - ***Dieste: Innovation in Structural Art: A prospect for structural ceramics***. New York, Princeton Architectural Press.

DIESTE, Eladio (2011) - ***Escritos sobre arquitectura***. Montevideo: Irrupciones grupo editor.

DIESTE, Eladio (1990) - ***La iglesia de Atlántida***. Basa, Gran

GROMPONE, Juan.(1993) - ***Eladio Dieste, maestro de la ingeniería***. Montevideo.

HUERTA, Santiago (1999) - ***Las bóvedas de Guastavino en América***. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

KHOSHNEVIS, B.; BRKEY, G. (2002) - “**Automated Construction using Contour Crafting – Applications on Earth and Beyond**,” Proceedings of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Gaithersburg, Maryland.

MICHAEL M. E. (2007) - ***Evolution of robotic arms***, Journal Robotic Surgery.

NUDELMAN, Jorge. (2011) - **Modulor 2: la pesada carga de la perfección. In: Seminario: La Biblioteca de la Arquitectura Moderna: Teorías de la arquitectura y del proyecto (1901-1962)**. Uruguay, Arquitectos.

RAGHEB, Fiona J. (2001) - **Frank Gehry**, Architect.

SCHODEK, Daniel (2004) - ***Digital Design and Manufacturing-Applications in Architecture and Design***. John Wiley & Sons.

TECTÓNICA (1995) - ***Cerámica (I)***. Barcelona: Grupo Folcrá Monografías de Arquitectura, Tecnología y Construcción. Vol. 15.

WARSAWSKI, A.; NAVON, R. (1998) - “**Implementation of robotics in buildings: current status and future prospects**,” *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.124.



## ÍNDICE DE IMAGENS

Figura 2.1 - <b>Pirâmides de Gizé, Egípto.:</b> Fonte ( <a href="http://classconnection.s3.amazonaws.com/1670/flashcards/859326/jpg/great-pyramid.jpg">http://classconnection.s3.amazonaws.com/1670/flashcards/859326/jpg/great-pyramid.jpg</a> ). ....	9
Figura 2.2 - <b>Abóbada do Palácio Ctesifonte, na cidade de Salman Pak no Iraque.:</b> Fonte ( <a href="http://cdn.roughguides.com/wp-content/uploads/2013/05/19.ctesiphon-42-24935270-1680x1050.jpg">http://cdn.roughguides.com/wp-content/uploads/2013/05/19.ctesiphon-42-24935270-1680x1050.jpg</a> ). ....	9
Figura 2.3 - <b>Abóbada Alentejana em fase de construção.:</b> Fonte ( <a href="http://1.bp.blogspot.com/-IEISORcbags/UW15uzNzv2I/AAAAAAAAANUw/kDmzg3nkr4s/s1600/ab%C3%B3bada.jpg">http://1.bp.blogspot.com/-IEISORcbags/UW15uzNzv2I/AAAAAAAAANUw/kDmzg3nkr4s/s1600/ab%C3%B3bada.jpg</a> ). ....	9
Figura 2.4 - <b>Vista da Entrada do edifício do CAUP/Planetário do Porto, com a "barriga" do edifício (uma parte da abóbada interior).:</b> Fonte( <a href="http://www.astro.up.pt/divulgacao/nimagens/2013Mai07_1.jpg">http://www.astro.up.pt/divulgacao/nimagens/2013Mai07_1.jpg</a> ). ....	9
Figura 2.5 - <b>Método tradicional de fabrico do tijolo, ainda usado em países subdesenvolvidos.:</b> Fonte ( <a href="http://farm3.static.flickr.com/2703/4493917046_c5b6f84303.jpg">http://farm3.static.flickr.com/2703/4493917046_c5b6f84303.jpg</a> ). ....	11
Figura 2.6 - <b>Método industrial de fabrico de tijolo, produção em massa e automatizada.:</b> Fonte ( <a href="http://www.theconstructionindex.co.uk/public/assets/press/2010/07/1278407918_measham-51-smaller.jpg">http://www.theconstructionindex.co.uk/public/assets/press/2010/07/1278407918_measham-51-smaller.jpg</a> ). ....	11
Figura 2.7 – <b>Conceito de produção de um tijolo ecológico e que permite a recolha de água:</b> Fonte ( <a href="http://www.yankodesign.com/images/design_news/2009/11/01/savewater2.jpg">http://www.yankodesign.com/images/design_news/2009/11/01/savewater2.jpg</a> ). ....	12
Figura 2.8 – <b>Brick Biotope, bloco de betão de secagem rápida moldado com a intenção de proporcionar fendas e ninhos para passaros.:</b> Fonte ( <a href="http://conservationmagazine.org/wordpress/wp-content/uploads/2013/06/brick-biotope1.jpg">http://conservationmagazine.org/wordpress/wp-content/uploads/2013/06/brick-biotope1.jpg</a> ). ....	12
Figura 2.9 - <b>“Raw materials” - Mistura da argila com a areia e a água.:</b> Fonte (DEPLAZES, Andrea. 2005). ....	13
Figura 2.10 - <b>“Modules” - Produção natural, secagem ao ar, Paquistão.:</b> Fonte (DEPLAZES, Andrea. 2005). ....	13
Figura 2.11 - <b>“Elements” - Ruínas encontradas no Líbano, de uma casa em tijolo.:</b> Fonte (DEPLAZES, Andrea. 2005). ....	13
Figura 2.12 - <b>"Structures" - Edifício em tijolo em fase de construção.:</b> Fonte (DEPLAZES, Andrea. 2005). ....	13
Figura 2.13 - <b>"The struture" - Edifício KNSM-Elland de Hans Kollhoff, Amesterdão.:</b> Fonte (DEPLAZES, Andrea. 2005). ....	13
Figura 2.14 - <b>Nomenclaturas dadas ao tijolo, referentemente à posição apresentada na fachada.:</b> Fonte ( <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Brickpositions.PNG">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Brickpositions.PNG</a> ). ....	14
Figura 2.15 - <b>Representação do corte efetuado no tijolo para a montagem nos diferentes estilos.:</b> Fonte ( <a href="http://1.bp.blogspot.com/-GC6bjWbo_yI/UWRiGsB00MI/AAAAAAAAAEmI/fHmQRK9eO1A/s320/image016-710364.jpg">http://1.bp.blogspot.com/-GC6bjWbo_yI/UWRiGsB00MI/AAAAAAAAAEmI/fHmQRK9eO1A/s320/image016-710364.jpg</a> ). ....	14
Figura 2.16 - <b>Header Bond, o mais comum dos estilos de alvenaria.:</b> Fonte (PFEITER, Günter. 2001) ....	14

Figura 2.17 - <b>Estilo Inglês - English Bond, o mais sóbrio e resistente.</b> : Fonte (PFEITER, Günter. 2001). .....	14
Figura 2.18 - <b>Estilo Gótico - Gothic Bond.</b> : Fonte (PFEITER, Günter. 2001) .....	15
Figura 2.19 - <b>Estilo Americano - American Bond.</b> : Fonte (PFEITER, Günter.2001) .....	15
Figura 2.20 - <b>Igreja Católica de Güstrow, desenhada por Paul Korff-Laage, Alemanha.</b> : Fonte ( <a href="http://www.katholische-kirche-guestrow.de/Bilder-mobil/guestrow-m.jpg">http://www.katholische-kirche-guestrow.de/Bilder-mobil/guestrow-m.jpg</a> ).....	15
Figura 3.1 - <b>Diferença entre a construção de Guastavino e Dieste, apesar de datar de uma época diferente a construção de Guastavino, possui um acabamento mais requintado.</b> : Fonte ( <a href="http://1.bp.blogspot.com/-PtulwIq6ZyA/UBdNnNgMJ2I/AAAAAAAAAFyA/Az_V47k9fxA/s1600/P1010192.jpg">http://1.bp.blogspot.com/-PtulwIq6ZyA/UBdNnNgMJ2I/AAAAAAAAAFyA/Az_V47k9fxA/s1600/P1010192.jpg</a> ) .....	22
Figura 3.2 - <b>Rafael Guastavino Moreno.</b> : Fonte ( <a href="http://espanyu.files.wordpress.com/2011/04/guastavino.jpg">http://espanyu.files.wordpress.com/2011/04/guastavino.jpg</a> ) .....	23
Figura 3.3 – <b>Teste de capacidade de carga de uma abóbada catalã.</b> : Fonte ( <a href="http://architecture.mit.edu/class/guastavino/features/ramage/strength_test.jpg">http://architecture.mit.edu/class/guastavino/features/ramage/strength_test.jpg</a> ) .....	23
Figura 3.4 - <b>Tijolo utilizado nas abóbadas de Guastavino, mais fino, ainda hoje é utilizado como decoração em falsas fachadas de tijolo à vista.</b> : Fonte ( <a href="http://wikivillage.co.za/sites/default/files/wiki/hico-brick-tiles/images/hico-brick-tiles_0.jpg">http://wikivillage.co.za/sites/default/files/wiki/hico-brick-tiles/images/hico-brick-tiles_0.jpg</a> ).....	24
Figura 3.5 - <b>Catedral de "St. John The Divine, Nova Iorque.</b> : Fonte ( <a href="http://krisdedecker.typepad.com/photos/uncategorized/2008/11/12/cathedral_of_saint_john_the_divine.jpg">http://krisdedecker.typepad.com/photos/uncategorized/2008/11/12/cathedral_of_saint_john_the_divine.jpg</a> ) .....	24
Figura 3.6 - <b>Diferença estrutural entre uma abóbada convencional e as abóbadas construídas através de um processo de adesão.</b> : Fonte (GUASTAVINO, Rafael. 1893). .....	24
Figura 3.7 - <b>Eládio Dieste Saint Martin.</b> : Fonte ( <a href="http://3.bp.blogspot.com/-fbNcRbf202Q/Trk3clwUfmI/AAAAAAAAAAzw/U7VymWtbp9M/s1600/Eladio+Dieste.jpg">http://3.bp.blogspot.com/-fbNcRbf202Q/Trk3clwUfmI/AAAAAAAAAAzw/U7VymWtbp9M/s1600/Eladio+Dieste.jpg</a> ).....	25
Figura 3.8 - <b>Igreja de Cristo Obreiro, Cidade de Atlântida.</b> : Fonte ( <a href="http://ricardotrevisan.files.wordpress.com/2011/11/dsc00098.jpg?w=512&amp;h=384">http://ricardotrevisan.files.wordpress.com/2011/11/dsc00098.jpg?w=512&amp;h=384</a> ).....	25
Figura 3.9 - <b>Conformação de uma parede regradada.</b> : Fonte (ROMÁN, Cláudio. 2012) .....	25
Figura 3.10 - <b>Construção da parede dupla e estrutural com câmara, da igreja de Atlântida.</b> : Fonte (ROMÁN, Cláudio. 2012). .....	26
Figura 3.11 – <b>Fotos da construção da Igreja de Cristo Obreiro, Atlântida.</b> : Fonte ( <a href="http://1.bp.blogspot.com/-mrigP-8xbx8/TYf12ZGaC7I/AAAAAAAAABPI/xCOEvCZAck/s1600/05.jpg">http://1.bp.blogspot.com/-mrigP-8xbx8/TYf12ZGaC7I/AAAAAAAAABPI/xCOEvCZAck/s1600/05.jpg</a> ). .....	26
Figura 3.12 – <b>Fotos da construção da Igreja de Cristo Obreiro, Atlântida.</b> : Fonte ( <a href="http://blogs.montevideo.com.uy/imgnoticias/200703/2756.JPG">http://blogs.montevideo.com.uy/imgnoticias/200703/2756.JPG</a> ). .....	26
Figura 3.13 – <b>Vista superior do museu MARTa Herford do arquiteto Frank O. Gehry.</b> : Fonte ( <a href="http://marta-herford.de/wp-content/gallery/marta-architektur/musem-marta-herford-gehry-1.jpg">http://marta-herford.de/wp-content/gallery/marta-architektur/musem-marta-herford-gehry-1.jpg</a> ). .....	27
Figura 3.14 – <b>Arquiteto Frank O. Gehry.</b> : Fonte ( <a href="http://press.tiffany.com/Shared/media/landing/ed5eb343b5fc448ba05ad95f89f124d6.jpg">http://press.tiffany.com/Shared/media/landing/ed5eb343b5fc448ba05ad95f89f124d6.jpg</a> ). .....	27

Figura 3.15 – <b>Parede de betão armado do nível inferior, antes do revestimento de tijolo.</b> : Fonte (GEHRY, Frank 2005). .....	28
Figura 3.16 – <b>Estrutura metálica do nível superior.</b> : Fonte (GEHRY, Frank 2005). .....	28
Figura 3.17 – <b>Cobertura em aço inoxidável, cria um paradoxo entre o peso do tijolo e a leveza visual.</b> : Fonte (GEHRY, Frank 2005). .....	28
Figura 3.18 – <b>Monica Ponce de Leon e Nader Tehrani.</b> : Fonte ( <a href="http://www.architectmagazine.com/Images/tmp459A.tmp_tcm20-141900.jpg">http://www.architectmagazine.com/Images/tmp459A.tmp_tcm20-141900.jpg</a> ). .....	29
Figura 3.19 – <b>Vista lateral da Tongxian Gatehouse, onde estão presentes a maioria dos vãos.</b> : Fonte ( <a href="http://archive.cooperhewitt.org/design-usa/exhibitions.cooperhewitt.org/Design-USA/images/366.jpg">http://archive.cooperhewitt.org/design-usa/exhibitions.cooperhewitt.org/Design-USA/images/366.jpg</a> ). .....	29
Figura 3.20 – <b>Vista frontal e lateral, realçando a textura conseguida através da rotação e afastamento dos tijolos.</b> : Fonte ( <a href="http://scripts.mit.edu/~crisman/blog/wp-content/uploads/2010/01/tongxian3.jpg">http://scripts.mit.edu/~crisman/blog/wp-content/uploads/2010/01/tongxian3.jpg</a> ). .....	29
Figura 4.1 – <b>Simulação do caminho otimizado da fresa, para a fabricação de uma peça.</b> : Fonte ( <a href="http://cfnewsads.thomasnet.com/images/large/527/527253.jpg">http://cfnewsads.thomasnet.com/images/large/527/527253.jpg</a> ). .....	37
Figura 4.2 – <b>O National Swimming Center, Beijing, foi desenvolvido através de um processo algorítmico.</b> : Fonte ( <a href="http://www.remotelands.com/images/citys/130116003.jpg">http://www.remotelands.com/images/citys/130116003.jpg</a> ). .....	38
Figura 4.3 – <b>Processo de fabrico de um objeto tridimensional, desde a modelação ao objeto real.</b> : Fonte ( <a href="http://share.3dstuffmaker.com/images/cademo.jpg">http://share.3dstuffmaker.com/images/cademo.jpg</a> ). .....	41
Figura 4.4 – <b>Tecnologia de Estereolitografia (SLA).</b> : Fonte ( <a href="http://www.aserm.net/files/2009/11/SLA_V1_1.jpg">http://www.aserm.net/files/2009/11/SLA_V1_1.jpg</a> ). .....	41
Figura 4.5 – <b>Tecnologia de impressão em gesso (3DP).</b> : Fonte ( <a href="http://content.hwigroup.net/images/articles/Zprinter_650_0290.jpg">http://content.hwigroup.net/images/articles/Zprinter_650_0290.jpg</a> ). ..	41
Figura 4.6 – <b>Tecnologia de fusão a quente de plásticos (FDM).</b> : Fonte ( <a href="http://www.popular3dprinters.com/wp-content/uploads/2013/08/fdm.png">http://www.popular3dprinters.com/wp-content/uploads/2013/08/fdm.png</a> ). .....	41
Figura 4.7 – <b>À esquerda uma impressora 3D comercial de alta definição, à direita uma Prusa 3D, impressora DIY, construída pelo utilizador, capaz de atingir definições de 0.01mm por camada, depois de bem afinada.</b> : Fonte ( <a href="http://farm6.static.flickr.com/5117/7002359486_23192bff50.jpg">http://farm6.static.flickr.com/5117/7002359486_23192bff50.jpg</a> ). .....	42
Figura 4.8 - <b>Torno mecânico CNC, capaz de produzir peças metálicas com elevadíssima precisão.</b> : Fonte ( <a href="http://www.cncmasters.com/images/Lathe-Shield-Guard.gif">http://www.cncmasters.com/images/Lathe-Shield-Guard.gif</a> ). .....	43
Figura 4.9 - <b>Fresadora industrial de 3 eixos controlada por CNC.</b> : Fonte ( <a href="http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/3-axis-high-speed-cnc-vertical-machining-centre-composites-res-ins-for-boatyards-shipyards-29215-2967017.jpg">http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/3-axis-high-speed-cnc-vertical-machining-centre-composites-res-ins-for-boatyards-shipyards-29215-2967017.jpg</a> ) .....	43
Figura 4.10 - <b>Fresadora de 5 eixos industrial, capaz de produzir peças maiores que automóveis.</b> : Fonte ( <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4f/5-Axis-Waterjet-Cutting-Head.jpg">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4f/5-Axis-Waterjet-Cutting-Head.jpg</a> ). .....	43
Figura 4.11 - <b>Torres Zollhof, do arquiteto Frank O. Gehry, Alemanha.</b> : Fonte ( <a href="http://2.bp.blogspot.com/-81oXKh4XH5E/TaJXwaAY65I/AAAAAAAAABmQ/CqbI9iGXDkK/s200/neue_zollhof_dusseldorf_wa261108.jpg">http://2.bp.blogspot.com/-81oXKh4XH5E/TaJXwaAY65I/AAAAAAAAABmQ/CqbI9iGXDkK/s200/neue_zollhof_dusseldorf_wa261108.jpg</a> ). .....	44

Figura 4.12 - <b>Fresagem dos moldes de esferovite, para as torres Zollhof.</b> : Fonte (GEHRY, Frank O. 1999) .....	44
Figura 4.13 - <b>Enchimento dos moldes com betão armado.</b> : Fonte (GEHRY, Frank O. 1999) .....	44
Figura 4.14 - <b>Processo de assemblagem dos painéis das torres Zollhof.</b> : Fonte (GEHRY, Frank O. 1999) .....	44
Figura 4.15 - <b>Estrutura do pavilhão Dynaform, cortada .em CNC.</b> : Fonte ( <a href="http://www.free-d.nl:8080/uploads/default/scale_1024x768_q100/95d732058d72c1b3ab7c74f01250b579a9bfe2f7.jpg">http://www.free-d.nl:8080/uploads/default/scale_1024x768_q100/95d732058d72c1b3ab7c74f01250b579a9bfe2f7.jpg</a> ) .....	45
Figura 4.16 – <b>Fabricação de uma peça, por aplicação de força mecânica.</b> : Fonte ( <a href="http://tcchan.files.wordpress.com/2010/10/picture-11-430x316.png?w=600">http://tcchan.files.wordpress.com/2010/10/picture-11-430x316.png?w=600</a> ). ....	45
Figura 4.17 – <b>Fabricação de um elemento através de posicionamento do molde e repouso por gravidade.</b> : Fonte ( <a href="http://www.robarch2012.org/wp-content/uploads/2011/11/harvard_gross1.jpg">http://www.robarch2012.org/wp-content/uploads/2011/11/harvard_gross1.jpg</a> ). ....	45
Figura 4.18 – <b>Moldagem a vácuo de acrílico usado como resguardo dos vãos do edifício Vakko Fashion Center &amp; Power Media Center.</b> : Fonte ( <a href="http://2.bp.blogspot.com/_ENJ5rmgoquk/TKrSRZKINJI/AAAAAAAAAQg/92_iOKuhUiE/s320/vakko4.jpg">http://2.bp.blogspot.com/_ENJ5rmgoquk/TKrSRZKINJI/AAAAAAAAAQg/92_iOKuhUiE/s320/vakko4.jpg</a> ). ....	46
Figura 4.19 - <b>Impressora pessoal 3D, fabrica peças a partir de fusão de vários tipos de plásticos.</b> : Fonte ( <a href="http://qzprod.files.wordpress.com/2013/04/3d-printer.jpg?w=880">http://qzprod.files.wordpress.com/2013/04/3d-printer.jpg?w=880</a> ). ....	47
Figura 4.20 - <b>Sistema Contour Crafting, depositando material camada a camada.</b> : Fonte ( <a href="http://parasite.usc.edu/wp-content/uploads/2010/03/USC-RSIE-BKhoshsnevis-robot2-e1267679937586.jpg">http://parasite.usc.edu/wp-content/uploads/2010/03/USC-RSIE-BKhoshsnevis-robot2-e1267679937586.jpg</a> ). ....	47
Figura 4.21 - <b>Simulação tridimensional de um mega estaleiro de construção automatizada.</b> : Fonte ( <a href="http://www.industrytap.com/wp-content/uploads/2013/06/Contour-Crafting.jpg">http://www.industrytap.com/wp-content/uploads/2013/06/Contour-Crafting.jpg</a> ). ....	47
Figura 4.22 - <b>Conjetura da possibilidade de construção automatizada de uma colónia lunar.</b> : Fonte ( <a href="http://media.treehugger.com/assets/images/2012/04/cc-road.jpg.492x0_q85_crop-smart.jpg">http://media.treehugger.com/assets/images/2012/04/cc-road.jpg.492x0_q85_crop-smart.jpg</a> ). ....	48
Figura 4.23 – <b>Intrincada linha de montagem automóvel, por meios de braços robotizados.</b> : Fonte ( <a href="http://www.nanowerk.com/images/robotic_assembly_line.jpg">http://www.nanowerk.com/images/robotic_assembly_line.jpg</a> ) .....	49
Figura 4.24 – <b>Uso desta tecnologia no âmbito da Arquitetura, empilhamento de tijolos.</b> : Fonte ( <a href="http://www.designbuild-network.com/uploads/feature/feature91659/2-rob2.jpg">http://www.designbuild-network.com/uploads/feature/feature91659/2-rob2.jpg</a> ) .....	49
Figura 5.1 – <b>Arquiteto e Engenheiro, Pilippe Block. Alguns dos resultados obtidos pela sua equipa, no BLOCK Research Group.</b> : Fonte (AZEVEDO, João 2013) .....	56
Figura 5.2 – <b>Criação e montagem de modelos a pequena escala, sem necessidade de colagem.</b> : Fonte (AZEVEDO, João 2013) .....	57
Figura 5.3 – <b>Modelo de uma abóbada de geometria livre, pelos métodos de Guastavino, mas utilizando um molde em cartão processado por CNC.</b> : Fonte ( <a href="http://krisdedecker.typepad.com/.a/6a00e0099229e88833014e8baf7d00970d-500wi">http://krisdedecker.typepad.com/.a/6a00e0099229e88833014e8baf7d00970d-500wi</a> ) .....	57
Figura 5.4 - <b>Fabio Gramazio.</b> : Fonte ( <a href="http://www.fabricate2014.org/wp-content/themes/arras-">http://www.fabricate2014.org/wp-content/themes/arras-</a>	

theme/library/timthumb.php?src=http://www.fabricate2014.org/wp-content/uploads/2012/12/gandk2.jpg&w=630&h=250&zc=1) .....	59
Figura 5.5- <b>Matthias Kohler.</b> : Fonte ( <a href="http://www.fabricate2014.org/wp-content/themes/arras-theme/library/timthumb.php?src=http://www.fabricate2014.org/wp-content/uploads/2012/12/gandk2.jpg&amp;w=630&amp;h=250&amp;zc=1">http://www.fabricate2014.org/wp-content/themes/arras-theme/library/timthumb.php?src=http://www.fabricate2014.org/wp-content/uploads/2012/12/gandk2.jpg&amp;w=630&amp;h=250&amp;zc=1</a> ) .....	59
Figura 5.6- <b>Exterior da instalação “Structural Oscillations”, no pavilhão Suíço.</b> : Fonte ( <a href="http://www.flickr.com/photos/outhouse/3025144231/sizes/o/in/photostream/">http://www.flickr.com/photos/outhouse/3025144231/sizes/o/in/photostream/</a> ) .....	60
Figura 5.7 - <b>Vista exterior da adega de Gantenbein.</b> : Fonte ( <a href="http://www.gantenbeinwine.com/slideimages/haus_1.jpg">http://www.gantenbeinwine.com/slideimages/haus_1.jpg</a> ). ....	61
Figura 5.8 - <b>Vista interior da adega de Gantebein, barris recebem luz indireta e ar fresco.</b> : Fonte ( <a href="http://www.gantenbeinwine.com/slideimages/inside_1.jpg">http://www.gantenbeinwine.com/slideimages/inside_1.jpg</a> ). ....	61
Figura 5.9 - <b>Aplicação automatizada da argamassa de fixação dos tijolos.</b> : Fonte ( <a href="http://www.rob-technologies.com/media/imgs/bricks/bricks001.jpg">http://www.rob-technologies.com/media/imgs/bricks/bricks001.jpg</a> ). .	61
Figura 5.10 - <b>"Structural Oscillations", instalação apresentada na 11ª Bienal de arquitetura de Veneza.</b> : Fonte ( <a href="http://static.dezeen.com/uploads/2009/09/Pike-Loop-by-GRAMAZIO-KOHLER-2.jpg">http://static.dezeen.com/uploads/2009/09/Pike-Loop-by-GRAMAZIO-KOHLER-2.jpg</a> ). ....	63
Figura 5.11 - <b>Estrutura automatizada de construção, R-O-B.</b> : Fonte ( <a href="http://static.dezeen.com/uploads/2009/09/Pike-Loop-by-GRAMAZIO-KOHLER-4.jpg">http://static.dezeen.com/uploads/2009/09/Pike-Loop-by-GRAMAZIO-KOHLER-4.jpg</a> ) .....	63
Figura 5.12 - <b>Braço robótico, KUKA KR150 L110.</b> : Fonte ( <a href="http://www.interactivearchitecture.org/2009/rob1-450x677.jpg">http://www.interactivearchitecture.org/2009/rob1-450x677.jpg</a> ) .....	64
Figura 5.13 – <b>Exemplo do protótipo de coluna da primeira edição do curso “Programmed Columns”, em 2009.</b> : Fonte ( <a href="http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/lehre/168.html">http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/lehre/168.html</a> ) .....	65
Figura 5.13 – <b>Protótipos que resultaram da segunda edição do curso “Programmed Columns”, em 2010.</b> : Fonte ( <a href="http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/lehre/175.html">http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/lehre/175.html</a> ) .....	65
Figura 5.14 – <b>Construção robotizada das colunas.</b> : Fonte ( <a href="http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/165.html">http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/165.html</a> ) .....	66
Figura 5.15 – <b>Interior do West Fest Pavillion.</b> : Fonte ( <a href="http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/165.html">http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/165.html</a> ) .....	66
Figura 5.16 – <b>Vista exterior do West Fest Pavillion.</b> : Fonte ( <a href="http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/165.html">http://dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/165.html</a> ) .....	66
Figura 5.17 - <b>Logótipo Rhinoceros 3D.</b> : Fonte ( <a href="http://2.bp.blogspot.com/_9ld7dge-5S0/StcZ0GPEmoI/AAAAAAAAAASc/dhXDv0Td-Cc/s320/20368647of3.png">http://2.bp.blogspot.com/_9ld7dge-5S0/StcZ0GPEmoI/AAAAAAAAAASc/dhXDv0Td-Cc/s320/20368647of3.png</a> ) .....	69
Figura 5.18 - <b>Ambiente de trabalho do software Rhinoceros 3D, numa plataforma Windows.</b> : Fonte ( <a href="http://www.rhino3dhelp.com/wp-content/uploads/2009/10/house5.jpg">http://www.rhino3dhelp.com/wp-content/uploads/2009/10/house5.jpg</a> ) .....	69
Figura 5.19 - <b>Logótipo do plug-in Grasshopper.</b> : Fonte ( <a href="http://i27.fastpic.ru/big/2011/0913/8d/62b686c1c288835df72da390ff10ab8d.jpg">http://i27.fastpic.ru/big/2011/0913/8d/62b686c1c288835df72da390ff10ab8d.jpg</a> ) .....	69
Figura 5.20 - <b>Base de trabalho onde são colocados e conectados os componentes do Grasshopper.</b> : Fonte ( <a href="http://pixhost.me/avaxhome/ea/76/001576ea_medium.jpeg">http://pixhost.me/avaxhome/ea/76/001576ea_medium.jpeg</a> ). ....	69



Figura 5.21 - <b>Ligação de uma placa de Arduino, placas de desenvolvimento para controlo de motores de passo, sensores, etc...</b> : Fonte ( <a href="http://static.squarespace.com/static/5029c46be4b0ce22e4c31cb6/t/510c2da0e4b0b50dd94e07c0/1359752613110/MacBookPro_06.png?format=500w">http://static.squarespace.com/static/5029c46be4b0ce22e4c31cb6/t/510c2da0e4b0b50dd94e07c0/1359752613110/MacBookPro_06.png?format=500w</a> ).....	70
Figura 5.22 - <b>Braço robótico industrial, ABB IRB 140.</b> : Fonte ( <a href="http://www.mach.ro/images/Roboti/475.jpg">http://www.mach.ro/images/Roboti/475.jpg</a> ). ....	70
Figura 5.23 - <b>Definição paramétrica desenvolvida para modelar paredes de tijolo com formas geométricas complexas.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013).....	71
Figura 5.24 - <b>Bloco de cortiça de dimensões 120X60X30mm, fabricado a partir de processos de CNC.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	71
Figura 5.25 - <b>Modelo tridimensional da construção da parede. Curva de influência da base a vermelho. Curva de influência de topo a azul:</b> Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	71
Figura 5.26 - <b>Parede controlo, de geometria plana.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013).....	73
Figura 5.27 - <b>Parede de dupla curvatura teste 1.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	73
Figura 5.28- <b>Parede de dupla curvatura teste 2.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	73
Figura 5.29 - <b>Parede de dupla curvatura teste 3.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	73
Figura 5.30 – <b>Garra desenvolvida pelo pessoal da FEUP.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013).....	74
Figura 5.31 – <b>Aplicação da cola quente, enquanto o robô faz a montagem da parede.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	74
Figura 5.32 – <b>Resultado final da parede de cortiça.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013).....	74
Figura 5.33 - <b>Layout de recolha dos blocos pelo braço robótico.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	75
Figura 5.34 - <b>Primeiras fiadas de blocos e ajustes no código.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013).....	75
Figura 5.35 - <b>Parede parcialmente concluída, recolha de imagens.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	75
Figura 5.36 - <b>Vista exterior da curvatura da parede.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013).....	75
Figura 5.37 - <b>Vista interior da curvatura da parede.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013) .....	75
Figura 5.38 e 5.39 - <b>Modelo no exterior e virado ao inverso da sua produção.</b> : Fonte (AZEVEDO, João. 2013). ....	75
Figura 6.1 - <b>Tabela demonstrativa do tempo necessário para uma construção em tijolo tradicional (CM) e o tempo necessário para a produção da mesma parede por métodos de Fabricação Digital (SBP) – montagem com tijolo standard e (CBP) – montagem com tijolo customizado.</b> : Fonte (LIU, Yuchen. 2009) .....	82

**APPENDIX\_**

## APPENDIX I

### Parede Paramétrica de Alvenaria - Parte 1

Experimentação formal

#### Variáveis

##### Tamanho do tijolo

X 0.060  
Y 0.120  
Z 0.030

##### Superfície

###### Curvas

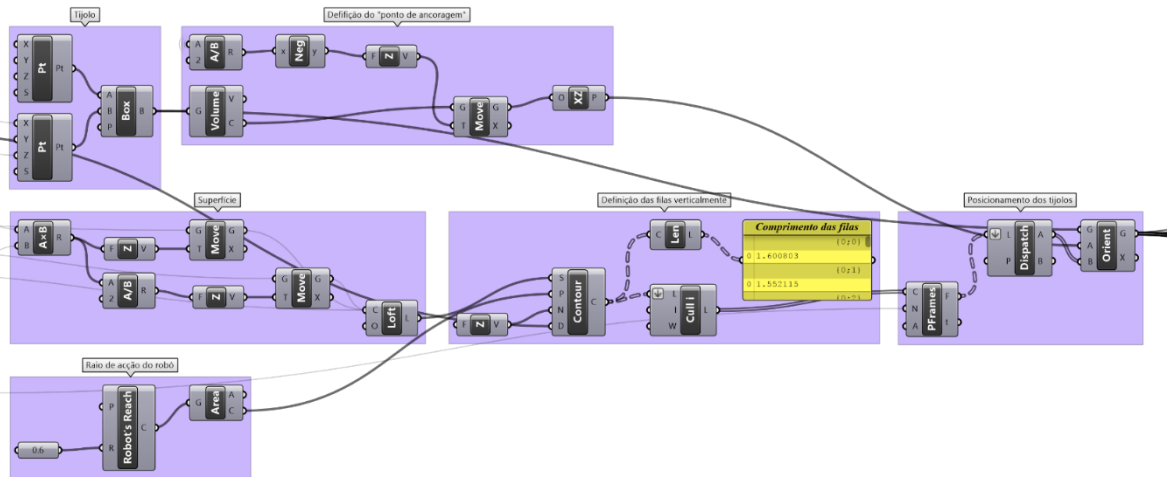
Top Self Edge  
Mid Self Curve  
Bottom Self Edge

##### Número de filas na vertical

Nº of Z rows 16

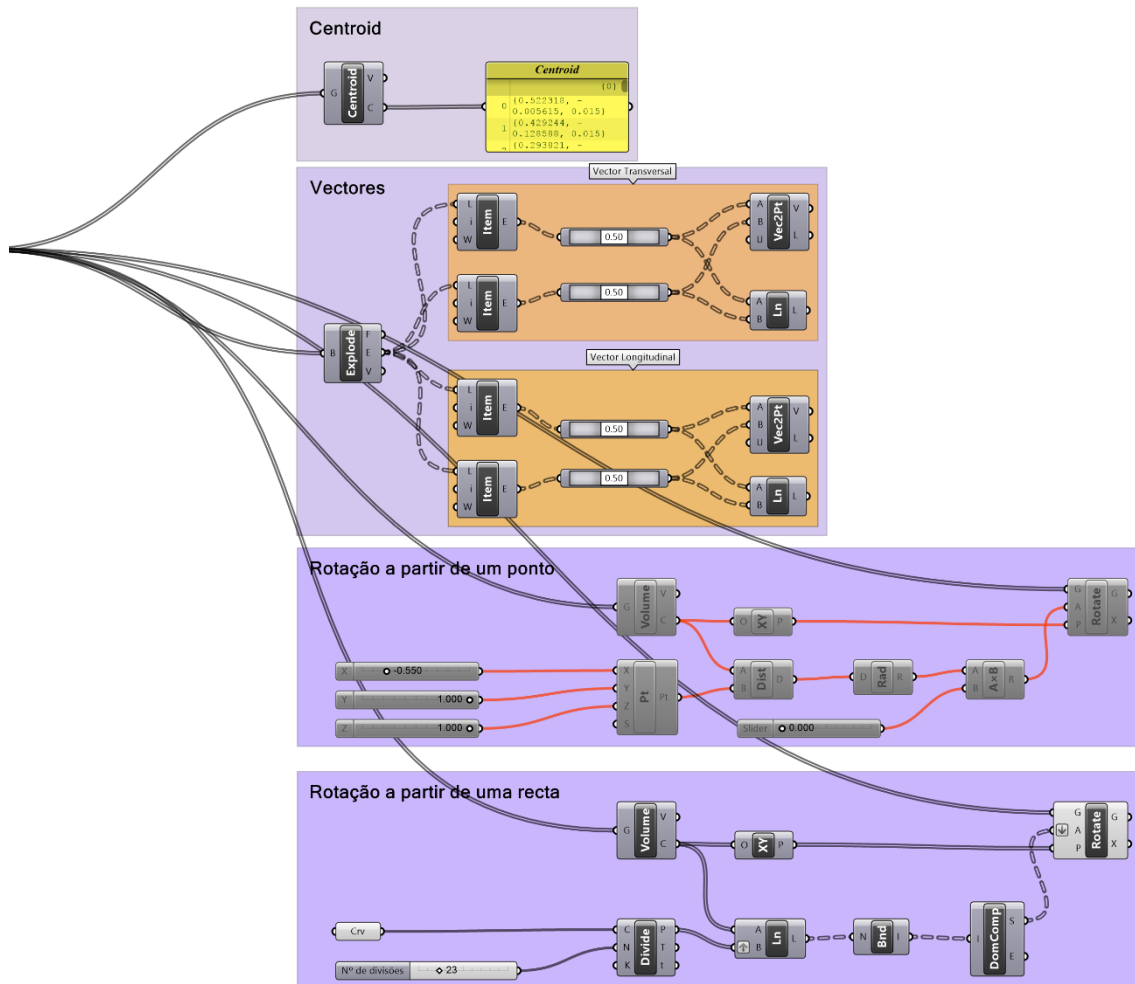
##### 2\*Número de tijolos por fila

2\*Nº por fila 20



## Parede Paramétrica de Alvenaria - Parte 2

Obtenção de coordenadas



## APPENDIX II

Tabela de coordenadas de posicionamento dos blocos da parede protótipo.

Fila	Número	Coordenadas	Vetor	
		<i>Centroid</i>	P1	P2
A	1	{1.172991, 0.045103, 0.015}	{1.171316, 0.10508, 0.015}	{1.174666, -0.014873, 0.015}
A	2	{1.187877, -0.100657, 0.015}	{1.177454, -0.04157, 0.015}	{1.1983, -0.159745, 0.015}
A	3	{1.226125, -0.241981, 0.015}	{1.204149, -0.186151, 0.015}	{1.248102, -0.297811, 0.015}
A	4	{1.306009, -0.362985, 0.015}	{1.258574, -0.326244, 0.015}	{1.353445, -0.399726, 0.015}
A	5	{1.445275, -0.374452, 0.015}	{1.389076, -0.395467, 0.015}	{1.501475, -0.353437, 0.015}
A	6	{1.572997, -0.303058, 0.015}	{1.523471, -0.336928, 0.015}	{1.622523, -0.269188, 0.015}
A	7	{1.691043, -0.216081, 0.015}	{1.643412, -0.252567, 0.015}	{1.738674, -0.179594, 0.015}
A	8	{1.808412, -0.128174, 0.015}	{1.759568, -0.16302, 0.015}	{1.857256, -0.093328, 0.015}
A	9	{1.933445, -0.051942, 0.015}	{1.879274, -0.07774, 0.015}	{1.987615, -0.026144, 0.015}
A	10	{2.070169, 0.000866, 0.015}	{2.013576, -0.019063, 0.015}	{2.126763, 0.020795, 0.015}
B	1	{1.172153, 0.075091, 0.045}	{1.112177, 0.073416, 0.045}	{1.23213, 0.076767, 0.045}
B	2	{1.177966, -0.02593, 0.045}	{1.173266, 0.033886, 0.045}	{1.182665, -0.085745, 0.045}
B	3	{1.202215, -0.169043, 0.045}	{1.186425, -0.111158, 0.045}	{1.218006, -0.226928, 0.045}
B	4	{1.259673, -0.301896, 0.045}	{1.226322, -0.252019, 0.045}	{1.293024, -0.351773, 0.045}
B	5	{1.373936, -0.384662, 0.045}	{1.314687, -0.3752, 0.045}	{1.433186, -0.394125, 0.045}
B	6	{1.51422, -0.355815, 0.045}	{1.459683, -0.380829, 0.045}	{1.568757, -0.330802, 0.045}
B	7	{1.639983, -0.283215, 0.045}	{1.590113, -0.316578, 0.045}	{1.689852, -0.249853, 0.045}
B	8	{1.758018, -0.19842, 0.045}	{1.710647, -0.235244, 0.045}	{1.805389, -0.161596, 0.045}
B	9	{1.872645, -0.109039, 0.045}	{1.824545, -0.144906, 0.045}	{1.920744, -0.073173, 0.045}
B	10	{1.992589, -0.027022, 0.045}	{1.941519, -0.058516, 0.045}	{2.043659, 0.004472, 0.045}
B	11	{2.098466, 0.010831, 0.045}	{2.118395, -0.045763, 0.045}	{1.23213, 0.076767, 0.045}
C	1	{1.177107, 0.0478, 0.075}	{1.179424, 0.107755, 0.075}	{1.17479, -0.012155, 0.075}
C	2	{1.186203, -0.096419, 0.075}	{1.17634, -0.037235, 0.075}	{1.196066, -0.155603, 0.075}
C	3	{1.227097, -0.234837, 0.075}	{1.202032, -0.180323, 0.075}	{1.252161, -0.289351, 0.075}
C	4	{1.31343, -0.34921, 0.075}	{1.26542, -0.313224, 0.075}	{1.36144, -0.385196, 0.075}
C	5	{1.450309, -0.382793, 0.075}	{1.390803, -0.390478, 0.075}	{1.509815, -0.375108, 0.075}
C	6	{1.586705, -0.336225, 0.075}	{1.532963, -0.362905, 0.075}	{1.640446, -0.309545, 0.075}
C	7	{1.711045, -0.262331, 0.075}	{1.661454, -0.296106, 0.075}	{1.760635, -0.228556, 0.075}
C	8	{1.82633, -0.174892, 0.075}	{1.780196, -0.213253, 0.075}	{1.872465, -0.13653, 0.075}
C	9	{1.935211, -0.079524, 0.075}	{1.89069, -0.119747, 0.075}	{1.979731, -0.039301, 0.075}



C	10	{2.040819, 0.019452, 0.075}	{1.998139, -0.022719, 0.075}	{2.083499, 0.061623, 0.075}
D	1	{1.178265, 0.077777, 0.105}	{1.11831, 0.080094, 0.105}	{1.238221, 0.075461, 0.105}
D	2	{1.177907, -0.02396, 0.105}	{1.174479, 0.035942, 0.105}	{1.181335, -0.083862, 0.105}
D	3	{1.203404, -0.166001, 0.105}	{1.185203, -0.108828, 0.105}	{1.221605, -0.223174, 0.105}
D	4	{1.269644, -0.293714, 0.105}	{1.232014, -0.24698, 0.105}	{1.307273, -0.340447, 0.105}
D	5	{1.386755, -0.374552, 0.105}	{1.328933, -0.358533, 0.105}	{1.444577, -0.39057, 0.105}
D	6	{1.529583, -0.370261, 0.105}	{1.471821, -0.386494, 0.105}	{1.587345, -0.354027, 0.105}
D	7	{1.663147, -0.315439, 0.105}	{1.610272, -0.343798, 0.105}	{1.716022, -0.287081, 0.105}
D	8	{1.784714, -0.237249, 0.105}	{1.73687, -0.273456, 0.105}	{1.832559, -0.201043, 0.105}
D	9	{1.893435, -0.141964, 0.105}	{1.851137, -0.184519, 0.105}	{1.935733, -0.09941, 0.105}
D	10	{1.988172, -0.032772, 0.105}	{1.95244, -0.080972, 0.105}	{2.023903, 0.015429, 0.105}
D	11	{2.062159, 0.040538, 0.105}	{2.10433, -0.002142, 0.105}	{1.238221, 0.075461, 0.105}
E	1	{1.177736, 0.048212, 0.135}	{1.181787, 0.108075, 0.135}	{1.173686, -0.011651, 0.135}
E	2	{1.186962, -0.096014, 0.135}	{1.175201, -0.037178, 0.135}	{1.198723, -0.15485, 0.135}
E	3	{1.236501, -0.231556, 0.135}	{1.206622, -0.179524, 0.135}	{1.26638, -0.283587, 0.135}
E	4	{1.333077, -0.337902, 0.135}	{1.283116, -0.304678, 0.135}	{1.383039, -0.371127, 0.135}
E	5	{1.469744, -0.379855, 0.135}	{1.409758, -0.37855, 0.135}	{1.52973, -0.38116, 0.135}
E	6	{1.611619, -0.354139, 0.135}	{1.554946, -0.373841, 0.135}	{1.668293, -0.334437, 0.135}
E	7	{1.742056, -0.291582, 0.135}	{1.690929, -0.322984, 0.135}	{1.793182, -0.26018, 0.135}
E	8	{1.857194, -0.203943, 0.135}	{1.813335, -0.244887, 0.135}	{1.901054, -0.163, 0.135}
E	9	{1.952199, -0.094835, 0.135}	{1.917911, -0.144073, 0.135}	{1.986486, -0.045597, 0.135}
E	10	{2.018683, 0.033469, 0.135}	{1.998509, -0.023037, 0.135}	{2.038857, 0.089976, 0.135}
F	1	{1.179761, 0.078144, 0.165}	{1.119898, 0.082194, 0.165}	{1.239625, 0.074094, 0.165}
F	2	{1.177158, -0.025233, 0.165}	{1.172153, 0.034558, 0.165}	{1.182162, -0.085024, 0.165}
F	3	{1.210879, -0.165929, 0.165}	{1.187771, -0.110558, 0.165}	{1.233987, -0.221301, 0.165}
F	4	{1.29013, -0.286595, 0.165}	{1.247866, -0.244007, 0.165}	{1.332394, -0.329183, 0.165}
F	5	{1.412316, -0.362552, 0.165}	{1.355207, -0.344153, 0.165}	{1.469426, -0.380952, 0.165}
F	6	{1.555926, -0.374367, 0.165}	{1.496413, -0.381995, 0.165}	{1.615439, -0.366739, 0.165}
F	7	{1.695256, -0.335039, 0.165}	{1.640267, -0.359044, 0.165}	{1.750245, -0.311034, 0.165}
F	8	{1.819846, -0.26107, 0.165}	{1.772446, -0.297856, 0.165}	{1.867247, -0.224284, 0.165}
F	9	{1.921973, -0.15834, 0.165}	{1.885631, -0.206081, 0.165}	{1.958316, -0.110598, 0.165}
F	10	{1.991999, -0.0317, 0.165}	{1.971507, -0.088092, 0.165}	{2.012492, 0.024692, 0.165}
F	11	{2.02877, 0.061723, 0.165}	{2.085277, 0.041548, 0.165}	{1.239625, 0.074094, 0.165}
G	1	{1.173831, 0.045654, 0.195}	{1.176307, 0.105602, 0.195}	{1.171355, -0.014295, 0.195}
G	2	{1.191205, -0.098135, 0.195}	{1.174414, -0.040532, 0.195}	{1.207995, -0.155738, 0.195}
G	3	{1.255083, -0.227983, 0.195}	{1.219354, -0.179782, 0.195}	{1.290813, -0.276185, 0.195}
G	4	{1.361934, -0.325298, 0.195}	{1.310399, -0.294571, 0.195}	{1.413469, -0.356026, 0.195}
G	5	{1.498577, -0.372116, 0.195}	{1.439058, -0.364537, 0.195}	{1.558097, -0.379696, 0.195}

G	6	{1.643063, -0.363874, 0.195}	{1.584582, -0.377292, 0.195}	{1.701543, -0.350456, 0.195}
G	7	{1.777774, -0.310434, 0.195}	{1.72591, -0.340602, 0.195}	{1.829639, -0.280267, 0.195}
G	8	{1.890748, -0.219669, 0.195}	{1.850207, -0.263901, 0.195}	{1.931288, -0.175437, 0.195}
G	9	{1.970565, -0.098798, 0.195}	{1.946077, -0.153573, 0.195}	{1.995053, -0.044022, 0.195}
G	10	{2.005931, 0.041544, 0.195}	{2.001648, -0.018303, 0.195}	{2.010214, 0.101391, 0.195}
H	1	{1.175069, 0.075628, 0.225}	{1.11512, 0.078104, 0.225}	{1.235018, 0.073152, 0.225}
H	2	{1.176366, -0.029187, 0.225}	{1.165947, 0.029902, 0.225}	{1.186784, -0.088275, 0.225}
H	3	{1.225858, -0.165167, 0.225}	{1.195858, -0.113205, 0.225}	{1.255858, -0.217128, 0.225}
H	4	{1.318874, -0.276019, 0.225}	{1.272911, -0.237451, 0.225}	{1.364837, -0.314586, 0.225}
H	5	{1.444194, -0.348372, 0.225}	{1.387812, -0.327851, 0.225}	{1.500575, -0.368893, 0.225}
H	6	{1.586702, -0.3735, 0.225}	{1.526702, -0.3735, 0.225}	{1.646702, -0.3735, 0.225}
H	7	{1.729211, -0.348372, 0.225}	{1.672829, -0.368893, 0.225}	{1.785592, -0.327851, 0.225}
H	8	{1.85453, -0.276019, 0.225}	{1.808568, -0.314586, 0.225}	{1.900493, -0.237451, 0.225}
H	9	{1.947546, -0.165167, 0.225}	{1.917546, -0.217128, 0.225}	{1.977546, -0.113205, 0.225}
H	10	{1.997039, -0.029187, 0.225}	{1.98662, -0.088275, 0.225}	{2.007458, 0.029902, 0.225}
H	11	{2.008072, 0.071468, 0.225}	{2.067919, 0.067185, 0.225}	{1.235018, 0.073152, 0.225}
I	1	{1.165031, 0.039888, 0.255}	{1.16109, 0.099758, 0.255}	{1.168972, -0.019983, 0.255}
I	2	{1.200618, -0.100016, 0.255}	{1.175683, -0.045442, 0.255}	{1.225553, -0.154589, 0.255}
I	3	{1.281611, -0.219705, 0.255}	{1.240504, -0.175998, 0.255}	{1.322718, -0.263411, 0.255}
I	4	{1.395401, -0.308964, 0.255}	{1.343273, -0.279254, 0.255}	{1.447529, -0.338674, 0.255}
I	5	{1.530118, -0.361599, 0.255}	{1.471604, -0.348331, 0.255}	{1.588633, -0.374867, 0.255}
I	6	{1.674316, -0.369808, 0.255}	{1.614777, -0.377234, 0.255}	{1.733855, -0.362382, 0.255}
I	7	{1.811031, -0.324013, 0.255}	{1.759107, -0.354078, 0.255}	{1.862955, -0.293947, 0.255}
I	8	{1.919249, -0.228655, 0.255}	{1.882673, -0.276218, 0.255}	{1.955825, -0.181092, 0.255}
I	9	{1.984968, -0.100106, 0.255}	{1.967487, -0.157503, 0.255}	{2.00245, -0.042709, 0.255}
I	10	{2.003308, 0.043205, 0.255}	{2.005717, -0.016747, 0.255}	{2.000899, 0.103157, 0.255}
J	1	{1.163061, 0.069823, 0.285}	{1.10319, 0.065882, 0.285}	{1.222931, 0.073764, 0.285}
J	2	{1.177138, -0.034027, 0.285}	{1.156645, 0.022365, 0.285}	{1.197631, -0.090419, 0.285}
J	3	{1.248247, -0.159252, 0.285}	{1.210982, -0.112227, 0.285}	{1.285512, -0.206277, 0.285}
J	4	{1.352038, -0.259389, 0.285}	{1.303908, -0.223563, 0.285}	{1.400168, -0.295216, 0.285}
J	5	{1.477168, -0.331254, 0.285}	{1.421975, -0.307722, 0.285}	{1.532361, -0.354786, 0.285}
J	6	{1.616098, -0.369763, 0.285}	{1.556574, -0.362222, 0.285}	{1.675622, -0.377304, 0.285}
J	7	{1.759214, -0.358698, 0.285}	{1.701855, -0.376301, 0.285}	{1.816574, -0.341095, 0.285}
J	8	{1.883137, -0.286546, 0.285}	{1.839219, -0.327428, 0.285}	{1.927054, -0.245665, 0.285}
J	9	{1.966673, -0.169608, 0.285}	{1.941654, -0.224142, 0.285}	{1.991693, -0.115073, 0.285}
J	10	{2.00401, -0.030545, 0.285}	{1.997908, -0.090234, 0.285}	{2.010112, 0.029144, 0.285}
J	11	{2.002103, 0.073181, 0.285}	{2.062055, 0.07559, 0.285}	{1.222931, 0.073764, 0.285}
K	1	{1.151396, 0.030954, 0.315}	{1.133642, 0.088267, 0.315}	{1.16915, -0.026359, 0.315}

K	2	{1.216009, -0.096955, 0.315}	{1.181138, -0.048128, 0.315}	{1.250879, -0.145782, 0.315}
K	3	{1.312651, -0.2032, 0.315}	{1.267732, -0.163421, 0.315}	{1.357569, -0.242978, 0.315}
K	4	{1.429045, -0.287475, 0.315}	{1.377369, -0.256985, 0.315}	{1.480721, -0.317965, 0.315}
K	5	{1.559294, -0.348112, 0.315}	{1.502489, -0.328796, 0.315}	{1.6161, -0.367427, 0.315}
K	6	{1.700277, -0.373273, 0.315}	{1.640287, -0.374372, 0.315}	{1.760267, -0.372173, 0.315}
K	7	{1.837288, -0.334851, 0.315}	{1.785639, -0.365386, 0.315}	{1.888937, -0.304316, 0.315}
K	8	{1.939914, -0.235675, 0.315}	{1.906623, -0.285592, 0.315}	{1.973204, -0.185757, 0.315}
K	9	{1.99671, -0.104207, 0.315}	{1.982242, -0.162437, 0.315}	{2.011178, -0.045978, 0.315}
K	10	{2.01069, 0.03853, 0.315}	{2.013526, -0.021403, 0.315}	{2.007855, 0.098463, 0.315}
L	1	{1.142519, 0.059611, 0.345}	{1.085206, 0.041857, 0.345}	{1.199832, 0.077365, 0.345}
L	2	{1.180362, -0.035538, 0.345}	{1.14553, 0.013316, 0.345}	{1.215195, -0.084392, 0.345}
L	3	{1.274737, -0.142871, 0.345}	{1.231478, -0.101293, 0.345}	{1.317995, -0.184449, 0.345}
L	4	{1.38475, -0.234234, 0.345}	{1.335957, -0.199315, 0.345}	{1.433542, -0.269152, 0.345}
L	5	{1.506494, -0.309275, 0.345}	{1.453275, -0.281568, 0.345}	{1.559713, -0.336982, 0.345}
L	6	{1.63908, -0.362436, 0.345}	{1.581164, -0.346762, 0.345}	{1.696997, -0.378109, 0.345}
L	7	{1.780586, -0.366873, 0.345}	{1.722355, -0.381334, 0.345}	{1.838818, -0.352413, 0.345}
L	8	{1.902526, -0.295441, 0.345}	{1.860348, -0.338114, 0.345}	{1.944705, -0.252768, 0.345}
L	9	{1.979902, -0.176087, 0.345}	{1.956935, -0.231517, 0.345}	{2.002868, -0.120656, 0.345}
L	10	{2.014917, -0.037781, 0.345}	{2.008124, -0.097395, 0.345}	{2.021709, 0.021833, 0.345}
L	11	{2.009273, 0.068497, 0.345}	{2.069205, 0.071333, 0.345}	{1.199832, 0.077365, 0.345}
M	1	{1.132395, 0.018505, 0.375}	{1.092444, 0.06327, 0.375}	{1.172346, -0.02626, 0.375}
M	2	{1.233426, -0.08176, 0.375}	{1.188839, -0.04161, 0.375}	{1.278013, -0.121909, 0.375}
M	3	{1.342066, -0.173802, 0.375}	{1.295015, -0.136569, 0.375}	{1.389116, -0.211034, 0.375}
M	4	{1.457439, -0.257207, 0.375}	{1.40732, -0.224221, 0.375}	{1.507558, -0.290194, 0.375}
M	5	{1.58059, -0.328526, 0.375}	{1.526617, -0.302317, 0.375}	{1.634563, -0.354735, 0.375}
M	6	{1.715274, -0.372711, 0.375}	{1.655658, -0.365932, 0.375}	{1.774889, -0.379491, 0.375}
M	7	{1.852146, -0.344096, 0.375}	{1.800453, -0.374555, 0.375}	{1.90384, -0.313636, 0.375}
M	8	{1.951575, -0.243976, 0.375}	{1.919366, -0.294598, 0.375}	{1.983784, -0.193354, 0.375}
M	9	{2.007632, -0.113636, 0.375}	{1.991764, -0.1715, 0.375}	{2.0235, -0.055772, 0.375}
M	10	{2.029176, 0.026824, 0.375}	{2.026878, -0.033132, 0.375}	{2.031474, 0.08678, 0.375}
N	1	{1.112419, 0.040887, 0.405}	{1.067654, 0.000936, 0.405}	{1.157184, 0.080839, 0.405}
N	2	{1.180072, -0.027829, 0.405}	{1.129817, 0.004948, 0.405}	{1.230328, -0.060607, 0.405}
N	3	{1.296666, -0.108799, 0.405}	{1.248454, -0.073083, 0.405}	{1.344878, -0.144514, 0.405}
N	4	{1.410122, -0.194151, 0.405}	{1.362043, -0.158255, 0.405}	{1.4582, -0.230046, 0.405}
N	5	{1.525853, -0.27636, 0.405}	{1.475846, -0.243204, 0.405}	{1.575859, -0.309517, 0.405}
N	6	{1.649079, -0.346554, 0.405}	{1.59456, -0.3215, 0.405}	{1.703597, -0.371609, 0.405}
N	7	{1.786776, -0.371592, 0.405}	{1.727461, -0.380632, 0.405}	{1.846091, -0.362552, 0.405}
N	8	{1.909044, -0.304413, 0.405}	{1.866972, -0.347192, 0.405}	{1.951115, -0.261635, 0.405}

N	9	{1.987402, -0.186867, 0.405}	{1.962426, -0.241422, 0.405}	{2.012378, -0.132313, 0.405}
N	10	{2.031545, -0.052206, 0.405}	{2.01867, -0.110808, 0.405}	{2.04442, 0.006397, 0.405}
N	11	{2.030325, 0.056802, 0.405}	{2.090281, 0.054504, 0.405}	{1.157184, 0.080839, 0.405}
O	1	{1.106342, 0.001436, 0.435}	{1.049244, 0.019869, 0.435}	{1.163441, -0.016998, 0.435}
O	2	{1.239191, -0.048605, 0.435}	{1.184956, -0.022941, 0.435}	{1.293425, -0.074269, 0.435}
O	3	{1.360547, -0.122058, 0.435}	{1.311792, -0.087089, 0.435}	{1.409303, -0.157028, 0.435}
O	4	{1.47362, -0.20805, 0.435}	{1.42636, -0.171083, 0.435}	{1.520879, -0.245016, 0.435}
O	5	{1.586935, -0.293707, 0.435}	{1.537748, -0.259347, 0.435}	{1.636123, -0.328067, 0.435}
O	6	{1.711123, -0.361456, 0.435}	{1.654076, -0.343196, 0.435}	{1.768384, -0.379716, 0.435}
O	7	{1.848744, -0.350525, 0.435}	{1.795822, -0.378797, 0.435}	{1.901666, -0.322254, 0.435}
O	8	{1.951288, -0.25399, 0.435}	{1.916522, -0.302892, 0.435}	{1.986053, -0.205089, 0.435}
O	9	{2.018368, -0.1291, 0.435}	{1.99548, -0.184563, 0.435}	{2.041255, -0.073637, 0.435}
O	10	{2.062255, 0.005878, 0.435}	{2.048001, -0.052404, 0.435}	{2.076509, 0.06416, 0.435}
P	1	{1.160612, -0.016798, 0.465}	{1.101028, -0.00975, 0.465}	{1.220197, -0.023846, 0.465}
P	2	{1.299523, -0.048753, 0.465}	{1.243824, -0.026444, 0.465}	{1.355221, -0.071062, 0.465}
P	3	{1.421276, -0.122752, 0.465}	{1.374079, -0.085706, 0.465}	{1.468473, -0.159799, 0.465}
P	4	{1.529168, -0.2165, 0.465}	{1.484801, -0.176107, 0.465}	{1.573535, -0.256892, 0.465}
P	5	{1.637984, -0.309122, 0.465}	{1.589621, -0.273612, 0.465}	{1.686347, -0.344632, 0.465}
P	6	{1.767336, -0.364933, 0.465}	{1.707375, -0.362781, 0.465}	{1.827298, -0.367085, 0.465}
P	7	{1.894547, -0.307858, 0.465}	{1.849856, -0.347892, 0.465}	{1.939238, -0.267824, 0.465}
P	8	{1.986346, -0.19872, 0.465}	{1.952817, -0.248477, 0.465}	{2.019876, -0.148962, 0.465}
P	9	{2.057391, -0.074785, 0.465}	{2.031037, -0.128688, 0.465}	{2.083744, -0.020883, 0.465}